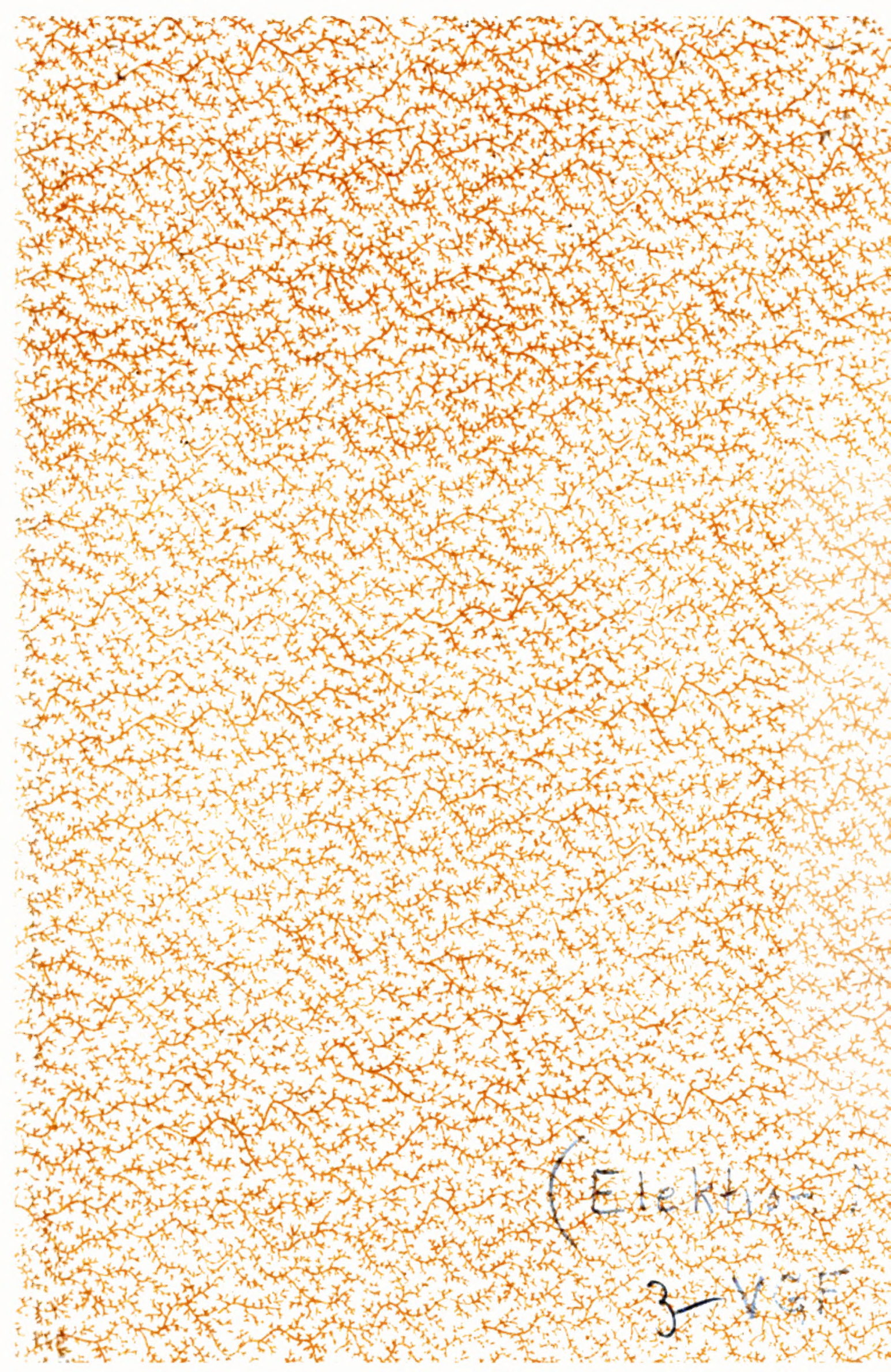


(Elektron-

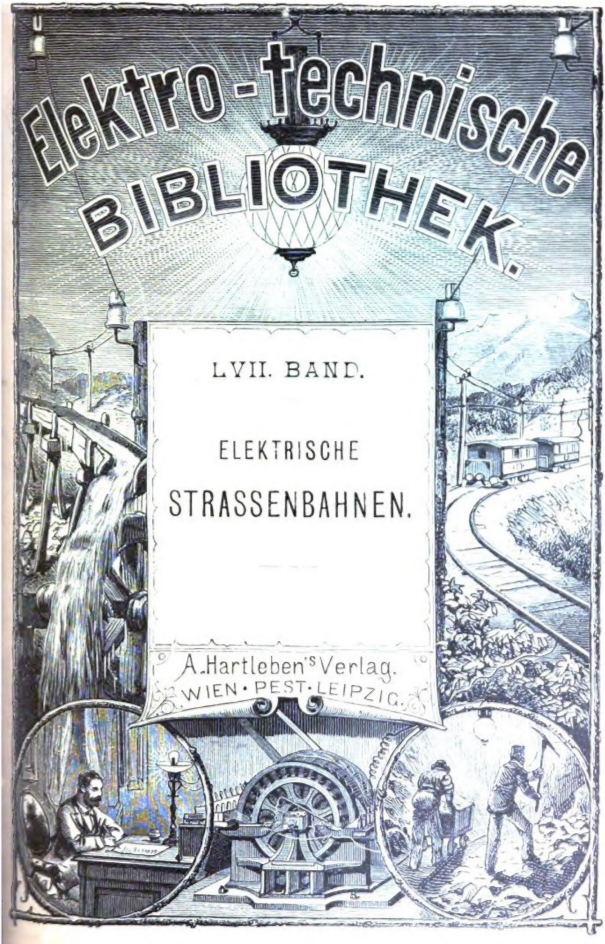
3-V2F

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google



Preis geh. 4 K 40 h = 4 M.; geb. 5 K 50 h = 5 M.

Digitized by Google

A. Hartleben's Elektro-technische Bibliothek.

In reich illustrirten Bänden geheftet à 3 *K* 30 *h* = 3 Mark = 4 Fr. = 1 R. 80 Kop.;
eleg. gebunden à 4 *K* 40 *h* = 4 Mark = 5 Fr. 35 Cts. = 2 R. 40 Kop.
Ab Band LVII kostet jeder Band geb. 4 *K* 40 *h* = 4 Mark; geb. 5 *K* 50 *h* = 5 Mark.

Inhalt der Sammlung:

I. Band. Glaser-De Cew. **Die dynamo-elektrischen Maschinen.** Ihre Geschichte, Grundlagen, Construction und Anwendungen. 6. Aufl., bearbeitet von Dr. F. Auerbach. — II. Band. **Die elektrische Kraftübertragung** und ihre Anwendung in der Praxis, mit besonderer Rücksicht auf die Fortleitung und Vertheilung des elektrischen Stromes. Von Eduard Japing. 3. Auflage. — III. Band. **Das elektrische Licht.** Von Dr. A. v. Urbanitzky. 3. Auflage. — IV. Band. **Die galvanischen Batterien, Accumulatoren und Thermosäulen.** Eine Beschreibung der hydro- und thermo-elektrischen Stromquellen mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Von W. Ph. Hauck. 4. Auflage. — V. Band. **Die Verkehrs-Telegraphie,** mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Von J. Sack. — VI. Band. **Telephon, Mikrophon und Radiophon,** mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Praxis. Von Theodor Schwartze. 3. Auflage. — VII. Band. **Die Elektrolyse, Galvanoplastik und Reinmetallgewinnung,** mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Praxis. Von Eduard Japing. 2. Auflage. — VIII. Band. **Die elektrischen Mess- und Präcisions-Instrumente.** Ein Leitfaden der elektrischen Messkunde. Von A. Wilke. 2. Auflage. — IX. Band. **Die Grundlehren der Elektricität,** mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von W. Ph. Hauck. 3. Auflage. — X. Band. **Elektrisches Formelbuch** mit einem Anhange, enthaltend die elektrische Terminologie in deutscher, französischer und englischer Sprache. Von Prof. Dr. P. Zech. — XI. Band. **Die elektrischen Beleuchtungs-Anlagen,** mit besonderer Berücksichtigung ihrer praktischen Ausführung. Von Dr. A. v. Urbanitzky. 3. Auflage. — XII. Band. **Die elektrischen Einrichtungen der Eisenbahnen und das Signalwesen.** Von L. Kohlfürst. — XIII. Band **Die elektrischen Uhren und die Feuerwehr-Telegraphie.** Von Dr. A. Tobler. — XIV. Band. **Die Haus- und Hôtel-Telegraphie.** Von O. Canter. 2. Auflage. — XV. Band. **Die Anwendung der Elektricität für militärische Zwecke.** Von Dr. Fr. Waechter. — XVI. Band. **Die elektr. Leitungen und ihre Anlage für alle Zwecke der Praxis.** Von J. Zacharias. 2. Aufl. — XVII. Band. **Die elektrische Eisenbahn** bezüglich ihres Baues und Betriebes. Von Josef Krämer. — XVIII. Band. **Die Elektro-Technik in der praktischen Heilkunde.** Von Prof. Dr. Rud. Lewandowski. — XIX. Band. **Die Spannungs-Elektricität, ihre Gesetze, Wirkungen und technischen Anwendungen.** Von Prof. K. W. Zenger. — XX. Band. **Die Weltliteratur der Elektricität u. des Magnetismus, von 1860—1883.** Von Gustav May. — XXI. Band. **Die Motoren der elektrischen Maschinen** mit Bezug auf Theorie, Construction und Betrieb. Von Theodor Schwartze. — XXII. Band. **Die Generatoren hochgespannter Elektricität.** Von Prof. Dr. J. G. Wallentin. — XXIII. Band. **Das Potential** und seine Anwendung zur Erklärung elektrischer Erscheinungen. Von Dr. O. Tumlirz. — XXIV. Band. **Die Unterhaltung und Reparatur der elektrischen Leitungen.** Von J. Zacharias. — XXV. Band. **Die Mehrfach-Telegraphie auf Einem Drahte.** Von A. E. Granfeld. — XXVI. Band. **Die Kabeltelegraphie.** Von Max Jüllig. — XXVII. Band. **Das Glühlicht,** sein Wesen und seine Erfordernisse. Von Etienne de Fodor. — XXVIII. Band. **Geschichte der Elektricität.** Von Dr. Gustav Albrecht. — XXIX. Band. **Blitz und Blitz-Schutzvorrichtungen.** Von Dr. A. v. Urbanitzky. — XXX. Band. **Die Galvanostegie** mit besonderer Berücksichtigung der fabriksmässigen Herstellung von Metallüberzügen. Von Josef Schaschl. — XXXI. Band. **Die Technik des Fernsprechwesens.** Von Dr. V. Wietlisbach. — XXXII. Band. **Die elektro-technische Photometrie.** Von Dr. Hugo Krüss. — XXXIII. Band. **Die Laboratorien der Elektro-Technik.** Von August Neumayer. — XXXIV. Band. **Elektricität und Magnetismus im Alterthume.** Von Dr. A. v. Urbanitzky. — XXXV. Band. **Magnetismus und Hypnotismus.** Von G. W. Gessmann. 2. Auflage. — XXXVI. Band. **Die Anwendung der Elektricität bei registrirenden Apparaten.** Von Dr. Ernst Gerland. — XXXVII. Band. **Elektricität und Magnetismus als kosmotellurische Kräfte.** Von Dr. Theodor Hoh. — XXXVIII. Band. **Die Wirkungsgesetze der dynamo-elektrischen Maschinen.** Von Dr. F. Auerbach. — XXXIX. Band. Materialien für Kostenvoranschläge elektr. Lichtanlagen. Von Etienne de Fodor. — XL. Band. **Die Zeittelegraphen und die elektrischen Uhren vom praktischen Standpunkte.** Von Ladislaus Fiedler. — XLI. Band. **Die elektrischen Motoren mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Strassenbahnen.** Von Etienne de Fodor. — XLII. Band. **Die Glühlampe.** Ihre Herstellung und Anwendung in der Praxis. Von J. Zacharias. — XLIII. Band. **Die elektrischen Verbrauchsmesser.** Von Etienne de Fodor. — XLIV. Band. **Die elektrische Schweissung und Löthung.** Von Etienne de Fodor. — XLV. Band. **Die elektrischen Accumulatoren und ihre Verwendung in der Praxis.** Von J. Sack. — XLVI. Band. **Elektricität direct aus Kohle.** Von Etienne de Fodor. — XLVII., XLVIII., XLIX. und L. Band. **Angewandte Elektrochemie.** In vier Bänden. Von Dr. Franz Peters. I. Band, Die Primär- und Secundär-Elemente. II. Band, 1. und 2. Abthlg., Anorganische Elektrochemie. III. Band, Organische Elektrochemie. — LI. und LII. Band, **Materialistisch-hypothetische Sätze** und Erklärung des Wesens und der Kraftäusserungen des elektrischen Fluidums. In 2 Bd. Von Dr. F. Ph. Stögermayr. — LIII., LIV., LV. u. LVI. Bd. **Elektrometallurgie u. Galvanotechnik.** Ein Hand- u. Nachschlagebuch f. d. Gewinnung u. Bearb. d. Metalle a. elektr. Wege. In 4 Bd. V. Dr. Fr. Peters, u. s. w.

A. Hartleben's Verlag in Wien, Pest und Leipzig.

Digitized by Google

ELEKTRISCHE

STRASSENBAHNEN.

VON

JOHANNES ZACHARIAS.

MIT 128 ABBILDUNGEN.

WIEN. PEST. LEIPZIG.
A. HARTLEBEN'S VERLAG.
1903.
(ALLE RECHTE VORBEHALTEN.)

NEW YORK
PUBLIC
LIBRARY

Druck von Friedrich Jasper in Wien.

VORWORT.

Die Straßenbahnen haben durch allgemeine Einführung des elektrischen Betriebes nicht allein einen ungeahnten Aufschwung genommen, sondern sie haben auch teilweise mehr den Charakter der Eisenbahnen erhalten und werden vielfach, wie z. B. in Deutschland, auch gesetzmäßig zu den Kleinbahnen gerechnet.

Das Pferd ist am Anfange des neuen Jahrhunderts aus dem Betriebe der alten gemütlichen Pferdebahnen verschwunden und an seine Stelle ist in den letzten Jahren der Elektromotor getreten. Auch der mechanische Betrieb der Straßenbahnen hat in großen Städten vielfach (im Straßenniveau) nicht mehr hingereicht, und man hat neue Bahnen über und unter den Straßen anlegen müssen, um dem Verlangen nach schnellem Verkehr großer Menschenmassen genügen zu können.

Die Einrichtungen, welche für diese gesteigerten Verkehrsbedürfnisse geschaffen wurden, sind im vorliegenden Werke beschrieben und durch zahlreiche Abbildungen erläutert worden.

Eine Reihe erster Firmen des In- und Auslandes hat hierbei den Verfasser durch bereitwillige und sehr weit gehende Unterlagen freundlich unterstützt, wofür hier noch besonderer Dank abgestattet sei. Der Um-

fang des Werkes gestattete leider nicht, hier alles aufzunehmen, und mußte manche wichtige Zeichnung oder Beschreibung für spätere Arbeiten zurückgelegt werden. Verfasser hat aus ersten Quellen und langjährigen eigenen Erfahrungen geschöpft, war er doch der Erste, welcher mit seinem verstorbenen Freunde Anthony Reckenzaun bereits 1885 einen Akkumulatorenwagen zu Berlin in Betrieb setzte. Etwa erst zehn Jahre später führte man Akkumulatorenbetrieb ein und heute sind die Wagenbatterien schon wieder abgeschafft, und Pufferbatterien leisten jetzt gute und wertvollere Dienste.

Hier zeigte sich so recht der Fortschritt und schnelle Wechsel in der Entwickelung des elektrischen Fahrbetriebes.

Charlottenburg, 1903.

Johannes Zacharias.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Vorwort V
Inhalts-Verzeichnis VII
Figuren-Verzeichnis IX
Alphabetisches Register XII
Allgemeines 1
1. Die Geleiseanlagen 10
2. Die Leitungsanlagen 24
Allgemeines 24
Die Tragkonstruktion der Oberleitung 29
Die Oberleitungen 30
Übersicht der Oberleitungsteile 34
Konstruktion der Unterstützungen 37
Unterirdische Stromzuführung 41
Hilfs-Geräte 44
Verhaltungsvorschriften für die an Montagewagen beschäftigten Personen 50
Vorschriften bezüglich des Schutzes der Telegraphen- und Fernsprechanlagen 58
Werkzeuge für die Herstellung der Oberleitung . . . 61
Lieferungsbedingungen für Fahr- und Hängedraht zur Oberleitung von Straßenbahnen 62
Isolationswiderstand von Installationen 68
Die Stromzuführung 69
3. Das rollende Material 71
Wagenausrüstung 77
a) Die Motoren 77
b) Die Stromabnehmer 85
c) Die Fahrschalter und Schaltungen 93
d) Beleuchtung und Heizung 100
e) Sicherheitsvorrichtungen 114
4. Das Kraftwerk 123
Anforderungen des elektrischen Betriebes an die Dampfmaschinen 136

Digitized by Google

Seite
Schwungräder 140
Der Ungleichförmigkeitsgrad 143
Pufferbatterien 149
5. Entwurf und Ausführung von Straßenbahnen . . 150
Projektieren 150
Anforderungen für direkte Stromzuführung 152
Vorschriften für Projektunterlagen für elektrische Straßenbahnen 153
Notwendigste Angaben für vorläufigen Kostenüberschlag 155
Kraftbedarf 156
Ausführungsarbeiten 167
6. Beschreibung einiger Bahnen 170
Straßenbahn in St. Gallen 170
Straßenbahn Altstätten–Berneck 184
Bahnanlage Meckenbeuren–Tettnang 190
Straßenbahn in Freiburg (Schweiz) 195
Schwebebahnen 201
Die elektrische Hoch- und Untergrundbahn von Siemens & Halske in Berlin 204
Die Franz-Joseph-Elektrische Untergrundbahn 211
Die elektrische Zahnradbahn in Barmen 224
Schluß 230
Tiefbahnen 230
Industriebahnen 232

Digitized by Google

Verzeichnis der Abbildungen.

Nr.		Seite
1.	Schienenquerschnitt	10
2.	Querschnitt mit Bettung	10
3.	Stumpfer Stoß	11
4 u. 4a.	Innenlasche mit Querschnitt	11
5.	Außenlasche	11
6.	Spurstange	11
7.	Geleisanordnung in gerader Strecke	13
8.	Geleisanordnung in gerader Strecke	14
9.	Winkelrechte Kreuzung	15
10.	Gerade Strecke mit abgehender Kurve	16
11.	Kurven für Wagenschuppen	17
12.	Vier kreuzende Geleise mit drei Kurven	18
13.	Kurven und Kreuzungen an einer Straßenecke	19
14.	Herzstück	20
15.	Weichenzunge	20
16.	Schienenverbinder	21
17.	Anbohren der Schienen für den kupfernen Verbinder	22
18.	Schienenschweißen mit Thermit	23
19.	Tiegel über der Form	25
20.	Tiegel mit Ablaßvorrichtung	25
21.	Gerade Tragöse	26
22.	Ankeröse	26
23.	Speiseöse	26
24.	Spleisöse	26
25.	Hängeisolator	27
26.	Wagenschuppenisolator	27
27.	Feste schräge Kreuzung	28
28.	Verstellbare Kreuzung	29
29.	Rechtsweiche für Fahrdrähte	30
30.	Linksweiche	30
31.	Y-Weiche für zwei Abzweigungen	31
32.	Weiche für drei Abzweigungen	31
33.	Kugelisolator	32
33a.	Kugelisolator (Schema)	33
34.	Spannschloß am Mast	33
35.	Schutzleiste	34

Digitized by Google

Nr.		Seite
36.	Verzierter eiserner Mast	35
37.	Liverpooler Maste	36
38.	Doppelter Ausleger für vier Drähte	37
39.	Verzierter Mast mit doppeltem Ausleger für zwei Drähte	38
40.	Auslegermast für Dickinsonsystem mit einem Draht	39
41.	Auslegermast für Dickinsonsystem mit zwei Drähten	40
42.	Unterleitung	42
43.	Montagewagen der Halleschen Straßenbahn	44
44.	Montagewagen der Union Elektrizitäts-Gesellschaft	45
45.	Montagewagen der Thorner Straßenbahn	46
46.	Montagewagen mit fester Plattform mit Ausleger	47
47.	Montagewagen mit stellbarer Plattform ohne Ausleger	48
48.	Montagewagen englischer Bauart	49
49.	Montagewagen englischer Bauart im Betrieb	51
50.	Montagewagen von Siemens & Halske	52
51.	Kabelkran	53
51a.	Mastenkran	54
52.	Große mechanische Leiter	55
53.	Unterer Teil der großen mechanischen Leiter	56
54.	Drahtkarren	57
55.	Normal-Untergestell zweiachsig	71
56.	Wagenachse und Räder	72
57.	Randflanschenquerschnitt	72
58.	Drehbares Untergestell	73
59.	Vierachsiger Motorwagen	74
60.	Querschnitte eines zweiachsigen Wagens	76
61.	Erste elektrische Bahn	77
62.	Erste elektrische Lokomotive	78
63.	Schneepflug	79
64.	Motorschaltung mit Folgepolen	80
65.	Geteiltes Zahnrad	80
66, 67.	Äußere Ansicht von Kapselmotoren	81, 82
68—71.	Ansichten der federnden Aufhängung	86—89
72a und c.	Siemens-Motor mit Vorgelege	90, 91
73.	Kontaktrad	92
74.	Drehlager für Kontaktrute	92
75.	Gabel für Kontaktrolle	93
76.	Die Dickinsonrolle	93
77.	Die Dickinsonrolle mit Kontaktrute	94
78.	Siemensbügel, fest	95
79.	Siemensbügel, drehbar	96
80.	Schaltung zweier Motoren	97
81.	Fahrschalter-Gehäuse	98
82.	Fahrschalter-Einrichtung	99
83.	Fahrschalter, obere Ansicht und Querschnitt	100

Digitized by Google

Nr.	Seite
84. Kuppelung zwischen zwei Wagen	101
85a und b. Kuppelung für Wagenbeleuchtung	101
86a und b. Kuppelung für Bremse	102
87. Wagenschaltung von Siemens & Halske	103
88. Kopflaterne für eine Lampe	104
89. Kopflaterne für zwei Lampen	105
90. Innenlaternen	106
91. Hörnerblitzableiter	107
92. Hörnerblitzableiter (Wirkung)	108
93. Handbremse	115
94a. Magnetbremse	116
94b—c. Magnetbremse (Befestigung)	117
95a. Luftbremse (Grundriß)	118
95b. Luftbremse (Ansicht)	118
95c. Luftpumpe	119
95d. Luftpumpe mit Regulator	119
96a. Schutzvorrichtung (Draufsicht)	120
96b. Schutzvorrichtung (Seitenansicht)	120
97. Sandstreuer	121
98. Dynamo für Kuppelung	124
99. Kuppelung für Dynamos	125
100. Dynamo für Zusammenbau	126
101. Feld einer großen Dynamo	128
102. Schnitt durch ein großes Kraftwerk	129
103. Dynamo (Luisenstraße, Berlin)	130
104. Dampfdynamo (Luisenstraße, Berlin)	131
105. Dampfdynamo (Schiffbauerdamm)	132
106. Schaltungsschema	133
107. Hauptschalttafel	134
108. Kesselhaus	135
109. Kondensrohrleitung	137
110. Kabelkeller	138
111. Kabelschalttafel	139
112. Zusatzdynamos	140
113. Selbsttätige Feuerung	141
114. Kühlturm nach Balke	143
115. Kühlturm nach Worthington	144
116. Kohlenkarren	145
117. Kohlenwage	147
118. Motorkurve	163
119. Lötvorrichtung	164
120. Leitungskurven im Fahrdraht	168
121, 122. Schwebebahn	202, 203
123—128. Hoch- und Untergrundbahn (Berlin)	206, 208, 210, 212, 214, 216

Sachregister.

Abspannungen 63.
Anforderungen für direkte Stromzuführung 152.
— des elektrischen Betriebes an die Dampfmaschinen 136.
Anbohren der Schienen 22.
Anker 79.
Ankeröse 26.
Arbeitsdraht 26, 29.
Arbeitsleitungen 25.
Aufhängung des Motors 86—89.
Ausleger 29, 37.
Ausführungsarbeiten 167.
Außentasche 11.
Beleuchtung und Heizung 100.
Beschreibung einiger Bahnen 170.
Blitzableiter 101, 107, 108.
Bremsen 114—120.
Dienstvorschriften 50, 104.
Drahtkarren 57.
Drehstrom 123.
Dynamomaschine 125.
Elektrische Hoch- und Untergrundbahn 204.
— Zahnradbahn 224.
Entwurf und Ausführung von Straßenbahnen 150.
Fahrschalter und Schaltungen 93.
Fahrdraht 62.
Feld einer Dynamo 128.
Geleiseanlagen 10.
Gewichte und Maße für Motor- und Anhängewagen ohne Ausrüstung 75.
Gleichstrommotoren für Motorwagen 85.
Hängedraht 38, 63.
Hilfsgeräte 44.
Industriebahnen 233.
Isolatoren 27, 33.
Isolationswiderstand 68.
Isoliermaterial 29.
Kabelkran 49.
Kapselmotor 78, 81, 82.
Kontaktvorrichtungen 26.
Kontaktstange 86.
Kontaktrollen 86, 93.
Kraftwerk 123.
Kupferdraht 26.
Kuppelungen 97, 101, 125.
Kurven 16.
Kreuzung 15, 28.
Kurvenabspannung für Bügelkontakt und Rolle 66.
Leitungsanlagen 24.
Lieferungsbedingungen für Fahr- und Hängedraht 62.
Luftpumpe 119.
Luftweichen 32.
Mastenkran 47, 54.

Montagewagen 44, u. s. w.
Montageleitern 48, 55.
Motorschaltung 80.
Motoren 77, 90.
Motorwagen 71, 74, 123.
Oberleitungen 30.
Oberleitungsteile 35.
Pufferbatterien 149.
Querdrahtaufhängung 29.
Raumbedarf für Wagenschuppen 75.
Registrierapparat 134.
Rollendes Material 71.
Rückleitung 17.
Schalter 97.
Schalldämpfer 33
Schienenbettung 10.
Schienenschweißen 20.
Schneepflug 79.
Schraub- oder Lötmuffen 31.
Schwebebahnen 201.
Schwungräder 140.
Sektionsschalter 27.
Spannschloß 33.
Spleisösen 26, 31.
Speiseöse 26, 31.
Spurstange 11, 13.
Stromzuführung 69.
Stromzuführung, unterirdische 41.
Stumpfer Stoß 11.
Teile eines Straßenbahnmotors 83.
Tiefbahnen 231.
Tragöse 26.
Tragkonstruktion der Oberleitung 29.
Ungleichförmigkeitsgrad 145.
Untergestell 71, 73.
Unterleitung 42.
Unterstützungen 37.
Verhaltungsvorschriften für die an Montagewagen beschäftigten Personen 50.
Vorschriften bezüglich des Schutzes der Telegraphenanlagen 58.
Vorschriften für Bügelkontakt 91.
Vorschriften für Führer von Motorwagen 104.
Vorschriften für Projektunterlagen für elektrische Straßenbahnen 153
Wagenachse 72.
Wagenausrüstung 77.
Wagenisolator 27.
Wagenschaltung 103.
Weichen 30, 31.
Werkzeuge für die Herstellung der Oberleitung 61.
Widerstände 93.

ELEKTRISCHE

STRASSENBAHNEN.

Allgemeines.

Ursprünglich bestanden die Straßenbahnen als Flachbahnen mit Pferdebetrieb, bei denen die Geleise in die Oberflächenbefestigung der Straßendämme versenkt und die Wagen einzeln von ein bis zwei Pferden gezogen wurden.

Das immer mehr in den großen Städten sich steigernde Verkehrsbedürfnis führte später zur Anwendung von Maschinenkraft an Stelle der Tierkraft. Man baute Dampfwagen, wie z. B. den von Rowan, die Natronlokomotive von Honigmann. Später versuchte man auch Gasmaschinen oder Motoren mit komprimierter Luft, bis schließlich am Ende des vergangenen Jahrhunderts die elektrische Kraft alle anderen Betriebsweisen verdrängte.

Die erste elektrische Bahn wurde nach der 1879 von Werner Siemens gemachten Erfindung 1881 zu Lichterfelde bei Berlin von Siemens & Halske erbaut. Bald darauf folgte die Linie Frankfurt a. M.—Offenbach, sowie Mödling—Hinterbrühl bei Wien.

Die erste Straßenbahn baute man in New-York 1850. Bis 1860 hatte man schon 30 und bis 1870 über 80 Linien in Betrieb. Die Erfindung des elektrischen Betriebes von Fahrzeugen ist eigentlich nicht neueren Datums. Die Erzeugung von Bewegung durch elektrischen Strom haben schon Männer wie Oerstedt 1817,

Ampère und Arago 1820—1825, Faraday 1824—1830 an der Magnetnadel studiert. Jacobi machte 1834 in Petersburg den Vorschlag, ein Boot durch eine Batterie zu treiben. Thomas Davenport konstruierte 1835 bis 1837 in Amerika die erste elektrische Lokomotive und Thomas Hall versuchte deren mehrere 1851 bis 1860 in Boston. Alle diese Versuche basierten jedoch noch auf höchst unvollkommenen Apparaten, bei denen Stahlmagnete und Primärelemente zur Anwendung kamen.

Nachdem Paccinotti, Gramme und Siemens 1867 das Prinzip der Dynamomaschine fast zugleich und unabhängig voneinander entdeckten, und v. Hefner-Alteneck den Trommelanker konstruiert hatte, Siemens als erster 1879 mit seiner praktisch brauchbaren elektrischen Eisenbahn in Berlin hervorgetreten war, begann eigentlich erst das Zeitalter des elektrischen Betriebes von Fahrzeugen aller Art. Hierzu kam noch die Vervollkommnung des Planté-Akkumulators durch Faure und Volckmar in Paris und Sellon in London 1880—1881.

Trouvé baute in Paris das erste elektrische Boot mit Akkumulatoren, und A. Reckenzaun in London, sowie Julien in Brüssel setzten die ersten Straßenbahnwagen mit Akkumulatoren 1884—1885 in Betrieb. In Hamburg machte J. L. Huber, in Berlin Reckenzaun Versuche mit Akkumulatorenwagen auf den Straßenbahnen. Zufolge geringer Haltbarkeit der Akkumulatoren führten diese Versuche zu keinem befriedigenden Ergebnis und man wandte sich allgemein der direkten Stromzuführung durch oberirdische Leitungen zu.

Werner Siemens wendete für die Stromzuführung die Schienen an, indem er 1879 in der Mitte zwischen dem Geleise eine dritte Kontaktschiene als Hinleitung anbrachte und die beiden Fahrschienen als Rücklei-

tung benützte. In Lichterfelde nahm derselbe 1881 die beiden Fahrschienen auf Holzschwellen als Stromleiter, während Alexander Siemens und dessen Assistent Boistel im gleichen Jahre in Paris die erste Oberleitung anwendeten.

Es waren zwei geschlitzte Rohre isoliert an Masten befestigt, in denen ein Schlitten mit einer federnden Kontaktrolle lief. — Siemens & Halske bauten dann zwei elektrische Bahnen mit geschlitzten Rohren, in denen Kontaktschiffchen laufen und zwar 1883 7 *km* zwischen Frankfurt a. M.—Offenbach und 1884 5 *km* zwischen Mödling—Hinterbrühl, die heute noch tadellos funktionieren. — In Nordamerika spannte man zwei Drähte dicht nebeneinander, auf denen ein Kontaktkörper mit Rollen lief, die an einem Seil wie bei der Siemens'schen Konstruktion vom Wagen mitgenommen wurden.*)

Viel später erst machte man Kontaktstangen mit zwei Rollen, die von unten sich gegen zwei Kontaktdrähte legten, wie z. B. in Cincinnati, woselbst 231 *km* mit 440 Wagen in Betrieb sind.

Seit 1888 wendete man in Nordamerika einen Draht und eine Kontaktrolle an und benützte die Fahrschienen als Rückleitung, und hiermit begann der rapide Aufschwung des heutigen Trolley-Systems (Rollen-System). Bereits 1890 waren in den Vereinigten Staaten von Nordamerika von 14.252 *km* Straßenbahn 4000 *km* nach diesem System elektrisch betrieben. 1895 waren von 21.239 *km* bereits 16.580 *km* und in Europa von 15.000 *km* 13.000 *km* elektrisch betrieben. So hat z. B. Boston 538 *km* Strecken mit 864 Motoren, von denen täglich 600 durch zirka 18.000 Ampère im Dienst gehalten sind, die von fünf Stationen

*) S. La Genèse de la Traction Electrique par Ernest Gerard Louvain 1898. Polleusius et Centerick; — u. Elektr. Verkehrstechnik von Johannes Zacharias. Jena 1907.

mit zusammen 22—26.000 Ampère Kapazität geliefert werden.

Um dem Auge die Stromleitungen zu entziehen und sie vor Beschädigungen besser zu schützen baute Holroyd Smith in Blackpool 1884 und Siemens & Halske in Budapest 1889 eine doppelte Unterleitung in einem Schlitzkanal; Love legte in Brüssel auch eine derartige Strecke an und zwar mit doppelten Kontakträdern. Ähnliche Anlagen machte man in Berlin, Washington und New-York, doch fand das System keine weitere Verbreitung. Lineff und mehrere Andere versuchten auch ein unterirdisches Kontaktsystem mit Magnetschluß und Teilleitern, jedoch ohne dauernden Erfolg, so daß das Oberleitungssystem, um das sich namentlich auch Sprague, Field, Edison, Elihu Thomson und Short verdient gemacht haben, heute noch vorwiegt.

Abänderungen der Kontaktrolle führte 1894 Alfred Dickinson in South Staffordshire ein, indem er dieselbe in einem besonderen Kopf der Kontaktstange um eine senkrechte Achse beweglich anordnete.

Obgleich die elektrischen Straßenbahnen deutschen Ursprungs sind, haben sich dieselben nicht in ihrem Ursprungslande zur heutigen Vollkommenheit ausgebildet, sondern in den Vereinigten Staaten von Nordamerika, woselbst man sehr bald die Wichtigkeit dieses neuen Verkehrsmittels erkannt hatte und mit großer Energie in wenigen Jahren dem elektrischen Betriebe von Straßenbahnen eine ungeahnte Ausdehnung gab, so daß schließlich die europäischen Staaten sich die erfolgreichen Konstruktionen und Erfahrungen der Nordamerikaner zu Nutze machten und gleichfalls auch die Umwandlung der bisherigen Pferdebahnen in elektrische Straßenbahnen und die Anlage neuer von vornherein elektrisch gebauter Verkehrswege sich angelegen sein ließen.

Wie es immer bei Neuerungen der Fall ist, hat man sowohl die Geleise wie auch die Betriebsmittel zunächst den bisherigen Pferdebahnen nachgebaut und ist dann erst dazu übergegangen, neue besonders für den elektrischen Betrieb geeignete Typen sowohl für die Geleise als auch für die Wagen und Motoren zu schaffen. — Der in den großen Städten sich schnell entwickelnde und jährlich wachsende Verkehr hat schließlich auch dazu genötigt, auf Verkehrswege zu sinnen, die nicht von anderen im Straßenniveau sich bewegenden Fuhrwerken und Personen abhängig sind, sondern die dem sonstigen Straßenverkehr dadurch entzogen werden, daß man sie höher oder tiefer als die Straßenfläche gelegt hat. Man hat auf diese Weise Untergrundbahnen und Hochbahnen geschaffen, die hauptsächlich die Straßen verfolgen, jedoch wo es nötig ist, auch unter Häusern und Flußläufen hinwegführen.

Diese Hoch- und Untergrundbahnen können infolge des ungehinderten Verkehrs ihre Züge sehr viel schneller fahren, so daß sie den Schnell- und Massenverkehr zwischen den Verkehrszentren, den Geschäftsvierteln und den weiter gelegenen Straßen und Vororten besser und schneller vermitteln als dies je eine Straßenbahn, die als Flachbahn gebaut ist, leisten kann.

Für die Hochbahnen hat man die Geleisanlagen auf teils eisernen, teils steinernen Viadukten gelegt und sie im übrigen den Eisenbahnen, beziehungsweise Vollbahnen nachgebildet.

Man hat jedoch auch unter Umständen statt der zweischienigen Geleise einschienige Bahnen gebaut, bei denen die Wagen unterhalb der Schiene auf diesen hängend und laufend sich befinden, so daß man diese Einrichtungen mit dem Namen Schwebebahnen belegt hat. Dieselben haben die Eigentümlichkeit, daß

man in den engsten Straßen mit wenig Unterstützungen derartige Schwebebahnen anlegen kann.

Die Untergrundbahnen haben sich in zwei typischen Formen entwickelt, teilweise als Unterpflasterbahnen, die hauptsächlich die Straßenzüge der großen Städte verfolgen und sich nur 75—90 *cm* unterhalb der Straßenfläche mit ihrer Decke befinden, im übrigen aber als gemauerte Tunnels ausgeführt sind, deren Decke aus eisernen Trägern mit dazwischen gewölbten Kappen besteht.

An Plätzen, wo dies nicht möglich ist, hat man Röhrenbahnen ausgeführt, indem man in größeren Tiefen von 8—15 *m* unter der Straßenfläche, beziehungsweise unter Flußläufen, Tunnels vorgetrieben hat, die mit, aus einzelnen Stücken zusammengesetzten Röhren ausgekleidet sind und auf diese Weise dem Geleise Festigkeit und Abschluß gegen das umgebende Erdreich und Grundwasser bieten. Vereinzelt hat man auch Bergbahnen als Zahnradbahnen angelegt.

Diese verschiedenen Typen von Bahnen, die lediglich dem Stadtschnellverkehr dienen und durch ihre Eigenart den Straßenverkehr entlasten, sind als »Unterpflasterbahnen« z. B. von der Firma Siemens & Halske in Budapest und teilweise auch in Berlin ausgeführt worden. Auch in Paris hat man ähnliche Einrichtungen bereits geschaffen.

Elektrische »Hochbahnen« auf fortlaufenden über der Straßenfläche gelegenen Viadukten, die hauptsächlich aus Eisenkonstruktion bestehen, findet man in Chicago, New-York, Berlin, Röhrenbahnen in London.

Während die Straßenbahnen innerhalb der Verkehrszentren der großen Städte im allgemeinen nicht mehr wie 12 *km* die Stunde machen dürfen, jedoch infolge des vielen Anhaltens, des großen Verkehrs und der unausgesetzten Reihenfolge elektrischer Wagen

gewöhnlich nicht mehr wie 8—9 *km* in der Stunde fahren, machen dieselben in den Vororten und weniger verkehrsreichen Straßen höchstens bis zu 25 *km* die Stunde, hingegen die Hochbahnen und Untergrundbahnen als höchste Geschwindigkeit bis 50 *km* die Stunde erreichen und liegt hierin hauptsächlich für die Vermittlung des starken Verkehrs ein großer Vorteil.

Zum Betriebe von Fahrzeugen aller Art ist infolge seiner Eigenschaften kein Motor so geeignet wie der Elektromotor und zwar nicht allein in Bezug auf seine Bedienung und Unterhaltung, sowie die Betriebskosten, als auch besonders bezüglich des schnellen Anfahrens und Anhaltens. — Während die bisherigen Dampfbahnen in den Städten bei dicht aneinander gelegenen Stationen mit etwa drei bis fünf Minuten Abstand ihre zulässige Maximalgeschwindigkeit erst etwa auf der Hälfte der Strecke zwischen zwei Stationen erzielen und dann bereits die Kraft vermindern müssen, um rechtzeitig anhalten zu können, gestattet der Elektromotor eine derartige Beschleunigung der Wagen, daß nach wenigen Sekunden des Anfahrens bereits die höhere Fahrgeschwindigkeit erreicht werden kann. Außerdem ist die ganze Handhabung, die Regulierung, das Bremsen behufs Anhaltens in keiner Weise so günstig zu gestalten wie bei elektrischem Betriebe.

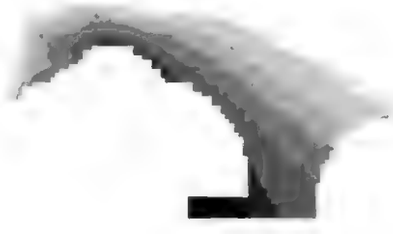
Während man bei Dampflokomotiven genötigt ist, der Lokomotive ein derartiges Gewicht zu geben, daß sie bei der erforderlichen Kraftleistung die nötige Adhäsion an den Schienen hat, kann man bei dem elektrischen Betriebe die Last der einzelnen Wagen selbst für die Adhäsion ausnützen und man vermeidet auf diese Weise unnütze tote Last, die man sonst mitbewegen müßte.

Man ist also in der Lage, je nach Bedarf jeden einzelnen Wagen mit einem, mit zwei oder mit vier

Elektromotoren zu versehen und man hat sinnreiche Schaltvorrichtungen erfunden, welche es gestatten, von jedem beliebigen Wagen aus die sämtlichen Elektromotoren eines Zuges derartig zu steuern, wie man es bei einem einzigen Elektromotor in einem kleinen Wagen machen kann. Es sind dies also Vorzüge, die insbesondere dem elektrischen Betriebe eigen sind.

Es ist jedoch auch noch ein anderes Moment, welches dem elektrischen Straßenbahnbetriebe den Vorzug gibt. Die elektrische Kraft kann man an einem oder wenigen Plätzen in großen Kraftwerken bis zu beliebiger Höhe billig erzeugen und sie selbst in ausgedehnten Städten auf die verschiedenen zu befahrenden Straßen und Plätze verteilen. Auf diese Weise wird der ganze Betriebsdienst sehr vereinfacht und verbilligt. Man ist bereits mit der Größe derartiger Maschinen für die Erzeugung der elektrischen Kraft von den früheren kleineren Maschinen von 150 bis 500 Pferdekräften neuerdings allmälig auf 1000, 3000 und jetzt schon auf 6000 Pferdekräfte gegangen. Das Feuerungsmaterial kann naturgemäß in derartigen großen Anlagen viel rationeller ausgenützt werden und es kann eine vollkommene Rauchverbrennung erzielt werden, welche die Luftverderbnis unserer Lokomotiven oder sonstiger kleiner Maschinenanlagen in der vollkommensten Weise vermeidet und also das Wohnen in großen Städten gesünder macht.

Für den Fernverkehr liegen die Verhältnisse nicht so günstig, und man streitet heute noch darüber, ob es technisch und wirtschaftlich möglich sein wird, große Fernbahnnetze elektrisch zu betreiben, und die Dampfmaschinentechniker machen große Anstrengungen, um ihre Lokomotiven rationeller zu bauen und den Betrieb derselben zu verbilligen. Das ist der heutige Stand der elektrischen Straßenbahnen im weiteren Sinne. Während man bisher unter einer



Straßenbahn lediglich eine in der Straße fahrende Niveaubahn verstand, hat sich der Begriff heute in der eben ausgeführten Weise in gewissem Sinne erweitert und wollen wir nachstehend die einzelnen Einrichtungen für die verschiedenen Zwecke kennen lernen.

Der Stoff, welchen wir zu behandeln haben, läßt sich übersichtlich in folgende Abschnitte einteilen:

1. die Geleiseanlagen,
2. die Leitungsanlagen,
3. das rollende Material,
4. die Kraftanlage,
5. verschiedene ausgeführte Bahnanlagen.

1. Die Geleiseanlagen.

Die Anlage der Schienengeleise ist bei Flachbahnen, welche in die Straßenflächen eingesenkt sind, gewöhnlich in der Weise hergestellt, daß man Schienen mit breitem Fuß, hohem Steg und einer in den Schienenkopf eingewalzten Rinne (Fig. 1) von etwa 25—30 *mm* Breite und gleicher Tiefe, je nach der Konstruktion der Fahrbahn, auf Schwellen oder direkt auf Betonunterlage verlegt (Fig. 2), so daß die Schienenoberkanten mit der Straßenfläche in gleicher Höhe sich befinden. Diese Einrichtung ist notwendig, damit sonstige Fuhrwerke ungehindert auf der Straße verkehren können und auch Fußgänger durch etwa überstehende Teile von Geleisen nicht behindert werden.

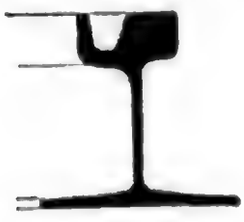


Fig. 1. Schienenquerschnitt.

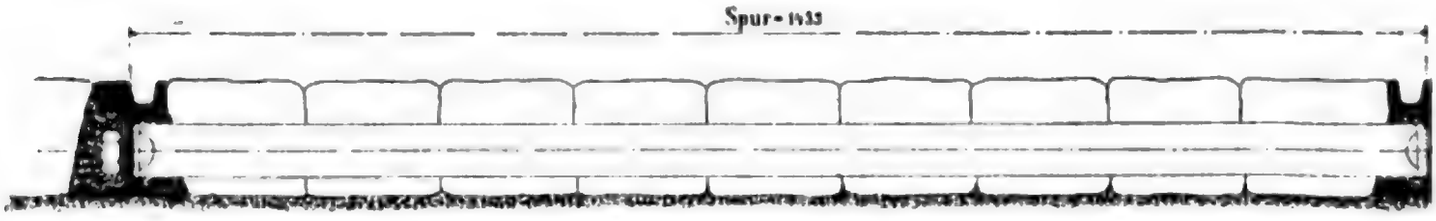


Fig. 2. Querschnitt mit Bettung.

Die Anordnung des gewöhnlichen stumpfen Stoßes zeigt Fig. 3 in der Seitenansicht, die Innenlasche ist in Fig. 4, die Außenlasche in Fig. 5 dargestellt, während Fig. 4*a* einen Querschnitt der Laschenverbindung gibt. Die in Fig. 2 sichtbare

Spurstange ist in Fig. 6 nochmals in vergrößertem Maßstabe dargestellt.

Die Anordnung der Schwellen für 9 *m*, bezie-

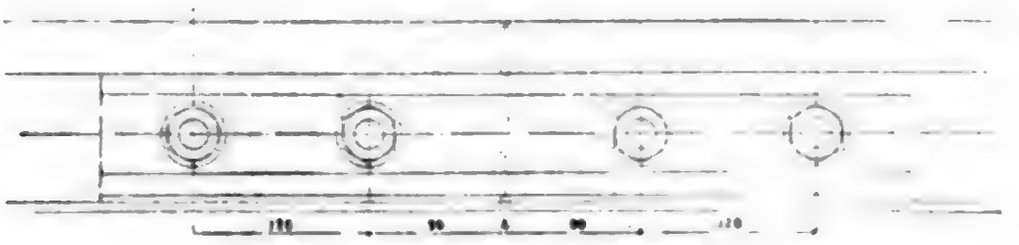


Fig. 3. Stumpfer Stoß.

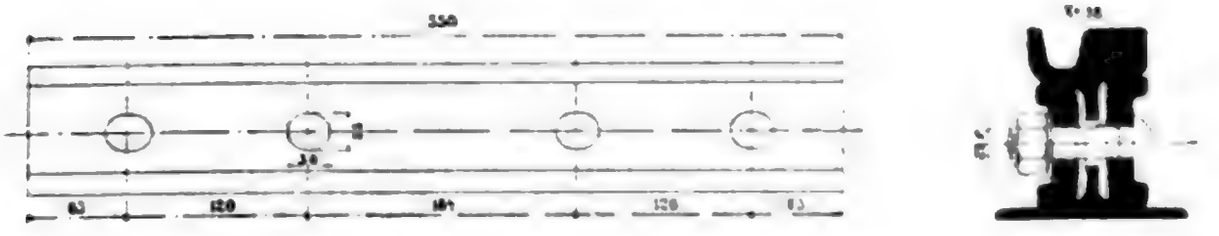


Fig. 4 und 4 a. Innenlasche mit Querschnitt.

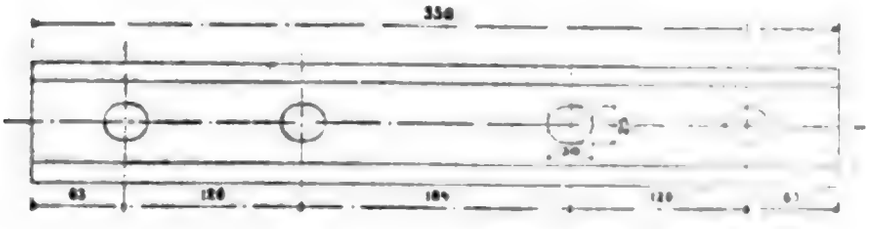


Fig 5. Außenlasche.

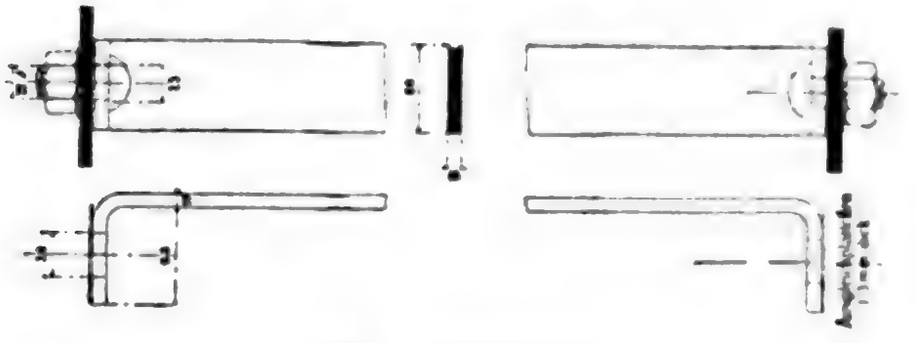


Fig. 6. Spurstange.

hungsweise 10 *m* lange Schienen zeigen Fig. 7 und 8.

Die Gewichte gebräuchlicher Profile sind in nachstehenden Tabellen angegeben, die sich auf das Fabrikat des Hoerder Bergwerks- und Hüttenvereines beziehen.

	Für 9 *m* Geleise bei 1435 *mm* Spur sind erforderlich Profil Nr. 38		
Schienen pr. l. Meter .	18 *m*	ca. 32 *kg*	= 576·00 *kg*
Laschen	4 (2 à 7·13; 2 à 7·9 *kg*)		= 30·06 »
Laschenschrauben. . .	8	à 0·53 *kg*	= 4·24 »
Unterlagringe	8	à 0·034 *kg*	= 0·27 »
Spurstangen	4 (60 × 10)	à 6·31 *kg*	= 25·24 »
Spurstangenschrauben .	8	à 0·46 *kg*	= 3·68 »
Unterlagringe	8	à 0·034 *kg*	= 0·27 »
Ausgleichplättchen . .	8	à 0·03 *kg*	= 0·24 »
Gewicht per 1 *m* Geleise ca.			71·11 *kg*
Bei 10 *m* Schienen Gewicht per 1 *m* Geleise ca.			70·40 »

	Für 9 *m* Geleise bei 1435 *mm* Spur sind erforderlich Profil Nr. 42		
Schienen pr. l. Meter .	18 *m*	ca. 40 *kg*	= 720·00 *kg*
Laschen	4 (2 à 9·4; 2 à 9·8 *kg*)		= 38·40 »
Laschenschrauben. . .	8	à 0·54 *kg*	= 4·32 »
Unterlagringe	8	à 0·034 *kg*	= 0·27 »
Spurstangen	4 (65 × 10)	à 7·92 *kg*	= 31·68 »
Spurstangenschrauben .	8	à 0·46 *kg*	= 3·68 »
Unterlagringe	8	à 0·034 *kg*	= 0·27 »
Ausgleichplättchen . .	8	à 0·034 *kg*	= 0·27 »
Gewicht per 1 *m* Geleise ca.			88·76 *kg*
Bei 10 *m* Schienen Gewicht per 1 *m* Geleise ca. .			87·88 »

Bei den unter das Straßenniveau versenkten Untergrundbahnen (oder Tiefbahnen), sowie bei den Hochbahnen ist die Verwendung der Rillenschienen nicht erforderlich, sondern es kann die gewöhnliche Vignoleschiene, wie sie bei den Eisen-

bahnen allgemein in Verwendung steht, gebraucht werden.

Um die beiden zu einem Geleise gehörigen Fahrschienen gleichmäßig im richtigen Abstand zu halten, pflegt man allgemein zwischen den Stegen der Schienen in etwa 2 *m* Entfernung Spurstangen festzuschrauben, d. h. Flacheisen, die an den Enden umgebogen und mit Schraubenbolzen an den Schienenstegen befestigt sind (Fig. 2 und 6).

Die Spurweite, d. h. die Entfernung der Rillen in dem Schienenkopf von der Außenseite der einen Schiene zur Außenseite der Rille in der anderen Schiene wird bei Straßenbahnen, beziehungsweise

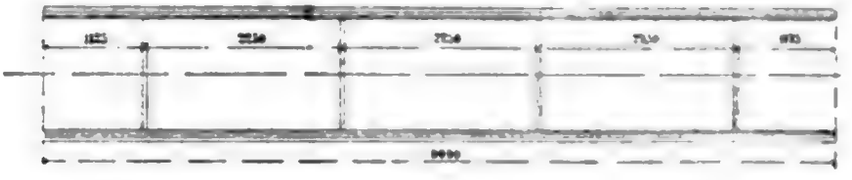


Fig. 7. Geleiseanordnung in gerader Strecke.

Kleinbahnen, je nach Umständen verschieden gewählt. In verkehrsreichen Städten pflegt man die Normalspur der Eisenbahnen hierfür zu wählen, welche 1·435 *m* beträgt. In engen Straßen und kleineren Ortschaften wählt man vielfach 1 *m* Spur. Man verwendet jedoch auch Spurweiten von 75, 65 oder 60 *cm*; geringe Spurweiten werden vielfach für Industriebahnen oder Bergwerksgeleise verwendet.

Ganz besondere Anlagen in den Geleisen sind erforderlich, wenn die direkte Stromzuführung sich nicht als Oberleitung über den Schienen, sondern als Unterleitung in einem unter den Schienen angebrachten Kanal befindet. In diesem Falle pflegt man gewöhnlich die Anlagen in der Weise herzustellen, daß die eine Schiene eine nach dem darunter befindlichen ovalen kleinen Kanal durchgehende Rinne erhält.

In diesem Kanal von etwa eiförmigem, also ovalem Querschnitt ist isoliert durch Porzellan die Stromzuführung, beziehungsweise die Unterleitung angebracht und zwar entweder als einfache Leitung, falls die Schiene als Rückleitung dienen soll, oder als Doppelleitung, falls keine Schienenrückleitung angewendet wird.

Die Weichenanlagen, welche zum Wechseln der Fahrtrichtung auf den Endstationen oder zum Übergang von einem Geleise auf das andere, oder zum Ausweichen bei eingeleisigen Bahnen gebraucht werden, unterscheiden sich im Prinzip sehr wenig von

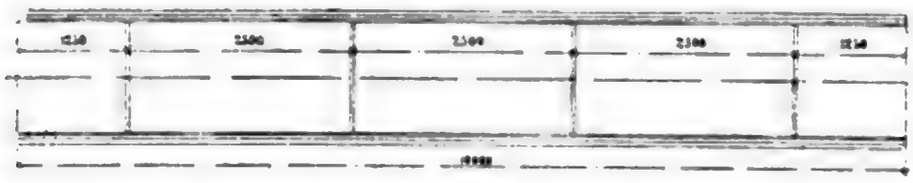


Fig. 8. Geleiseanordnung in gerader Strecke.

den bei Eisenbahnen angewendeten Weichenanlagen, während bei der Unterleitung mit Schlitzkanälen meist umfangreiche und gut fundierte Bauten an den Weichenanlagen erforderlich werden, was in der Konstruktion des Schienenschlitzes und auch der darunter liegenden Stromzuführung begründet ist.

Bezüglich der sonstigen Grundbedingungen für die Anlage von Geleisen, wie sie für Vollbahnen gelten, sind mancherlei Abweichungen bei Straßenbahnen im Niveau der Straßen erforderlich. So kann z. B. die in den Kurven angewendete Überhöhung der Außenschienen einer Geleisekrümmung gewöhnlich nicht angewendet werden, weil dies die Straßenfläche nicht gestattet und auch bei der geringeren Fahrgeschwindigkeit der Flachbahnen hierzu keine besondere Veranlassung vorliegt.

Die Kurven können, entsprechend dem bei Straßenbahnwagen meist geringen Achsenabstand, kleiner sein als bei Eisenbahnen, und da größere Wagen gewöhnlich vier Achsen haben, von denen je zwei in einem unter dem Wagenkasten drehbaren Lenkschemel angeordnet sind, so können vielfach geringe Krümmungen bis etwa zu 15 *m* Radius in den Geleisen angewendet werden.

In Kreuzwegen, sei es in rechtwinkelig oder spitzwinkelig zusammentreffenden Geleisen, pflegt man be-

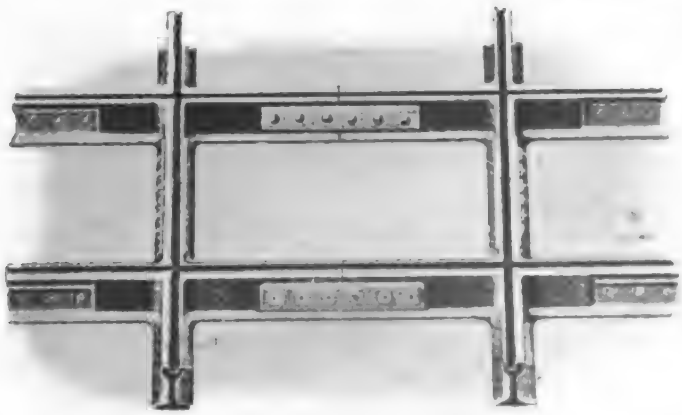


Fig. 9. Winkelrechte Kreuzung.

sondere Kreuzungsstücke (Fig. 9) die aus dem gleichen Schienenmaterial, aus welchem die geraden Geleise hergestellt werden, gefertigt sind, anzulegen, indem man passende Stücke von Rillenschienen durch entsprechend gebogene schmiedeeiserne Winkel zusammenschraubt und fertig vereinigt zum Bauplatz liefert.

Geleisetechnik bei Straßenbahnen. Entsprechend den eigenartigen von den Eisenbahnen abweichenden Verhältnissen hat sich auch die Einrichtung der Geleise in gewissen abweichenden Formen entwickelt, von denen wir einige charakteristische hier im Bilde wiedergeben.

Fig. 10 zeigt zwei durchgehende gerade Geleise, mit zwei seitlich abgehenden Kurven, die wiederum

Digitized by Google

mit einer dritten Kurve mit der geraden Strecke in Verbindung stehen, so daß also eine dreieckige Verzweigung der Geleise stattfindet. Eine viel gebrauchte Kurvenanlage zum Verteilen der Wagen in die Wagenschuppen gibt Fig. 11 wieder. Vier kreuzende Geleise, die durch drei Kurven miteinander in Verbindung stehen, sind in Fig. 12 dargestellt. Eine ähnliche Verzweigung an der Ecke einer Straße gibt Fig. 13 wieder.

Fig. 10. Gerade Strecke mit abgehender Kurve.

Die für diese Verzweigungen gebrauchten Herzstücke und Weichenzungen sind in Fig. 14 und Fig. 15 abgebildet.

Bei Hoch- und Untergrundbahnen kann man in gleicher Weise die Geleiseanlagen herstellen, wie bei den Eisenbahnen, indem man gut imprägnierte Holzschwellen bei den Hochbahnen gewöhnlich auf den einzelnen Jochen des Viaduktes anbringt, oder sie in den Tunnels auf einer zuvor in die richtige Ebene gebrachte Tunnelbettung verlegt.

Um den Schall und das Geräusch der schnellfahrenden Züge bei elektrischen Hochbahnen zu dämpfen, hat man z. B. bei der Berliner Hochbahn

Digitized by Google

den Viadukt in der Weise hergestellt, daß man die Fahrbahn zunächst mit Buckelblechen abgedeckt hat, die mit einer starken Schicht von Bimsbeton ausgefüllt sind, so daß hierdurch eine bedeutende Schalldämpfung erzielt worden ist. Teilweise liegen die Schwellen auch auf besonderer Kiesbettung.

Da man im allgemeinen bei allen elektrischen Straßenbahnen zur Verminderung der Anlagekosten

Fig. 11. Kurven für Wagenschuppen.

als Rückleitung die Schienengeleise verwendet und die gewöhnlichen Stoßverbindungen an den einzelnen Schienenköpfen für die Leitung des elektrischen Stromes nicht genügen, so sind besondere Vorkehrungen erforderlich, welche von Schiene zu Schiene sowohl in der Längsrichtung wie in der Querrichtung einen guten metallischen Kontakt erzeugen, so daß der elektrische Widerstand der sämtlichen Schienengeleise einer Strecke ein Minimum wird.

Diese Schienenverbindungen sind je nach der gewählten mechanischen Verbindung der Schienen-

Digitized by Google

enden sehr verschieden. Bei Laschenverbindungen, bei welchen zu beiden Seiten des Schienensteges eiserne Platten mit 4—6 Bolzen verschraubt werden, gebraucht man kupferne Bügel (Fig. 16), von denen je einer zu jeder Seite einer Schiene fest in den Schienensteg vernietet wird. Oder man bringt unterhalb der Lasche an dem Schienensteg eine biegsame kupferne Verbindung an, welche beim Festschrauben der Lasche zusammengepreßt wird und einen sicheren

Fig. 12. Vier kreuzende Geleise mit drei Kurven.

Kontakt erzielt. (Fig. 17 zeigt die Anbringung eines Verbinders.)

Da man allmählich die Wagen der Straßenbahnen immer mehr vergrößert und dadurch auch ihr Gewicht vermehrt hat, so genügen insbesondere bei den Flachbahnen, die in dem Straßenpflaster versenkte Geleise haben, nicht mehr die gewöhnlichen Laschenverbindungen, und man ist dazu übergegangen, sogenannte Fußlaschen anzuwenden, welche auch von unten den Schienenfuß unterstützen.

Neuerdings hat man auch nach der Erfindung von Scheinig & Hofmann zu Linz in Oberösterreich

einen Schienenschuh konstruiert, der heiß unter die Stoßverbindung gelegt und dann durch einen Stahlkeil festgezogen wird, so daß nach dem Erkalten der Verbindung äußerst fester und sicherer Kontakt, sowie mechanische Festigkeit erzielt wird.

Fig. 13. Kurven und Kreuzungen an einer Straßenecke.

Von anderer Seite hat man nach dem Patent Falk insbesondere in Nordamerika den umgossenen Schienenstoß angewendet. Bei diesem Verfahren werden die Geleise zunächst in gewöhnlicher Weise ausgerichtet, in ihrer Höhe festgelegt und alsdann an den Stoßverbindungen eiserne Formen herumgeschraubt, die oben eine Eingußöffnung haben und den Schienenstoß allseitig umschließen. Während eine Arbeiter-

Digitized by Google

kolonne die Stoßverbindungen in dieser Weise vorbereitet, ist eine andere mit einem fahrbaren Gebläseofen beschäftigt, gewöhnliches Gußeisen unter Zusatz von Koks zu schmelzen, das aus dem Ofen in Tiegel abgelassen wird, die man nach den Stoßverbindungen trägt und hier in die Formen ausgießt. Man erhält auf diese Weise an jedem Schienenstoß einen um denselben gegossenen Eisenklumpen, der bei der großen Hitze die Schienenenden vollständig verschweißt

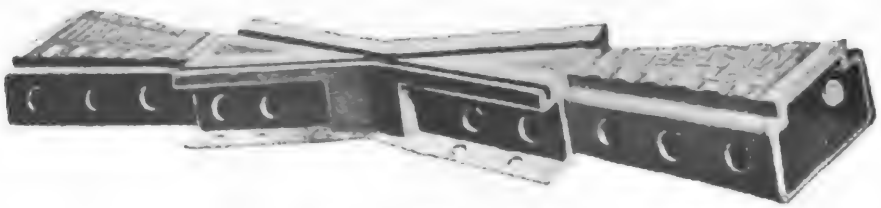


Fig. 14. Herzstück.

Fig. 15. Weichenzunge.

und nach dem Erkalten eine äußerst innige Verbindung darstellt.

In neuester Zeit ist dieses Verfahren des Schweißens der Schienenstöße nach der Erfindung von Dr. Goldschmidt in Essen a. R. noch bedeutend vereinfacht worden. Derselbe hat gefunden, daß eine Mischung von Eisenoxyd mit Magnesium, Thermit genannt, und Zusatz von Eisen in Stücken die Möglichkeit bietet, auf chemischem Wege in kürzester Zeit eine derartige Hitze zu erzeugen, daß das Eisen schmilzt, das Eisenoxyd zu Eisen reduziert wird, indem das Magnesium beziehungsweise Aluminium dem Eisen-

Digitized by Google

oxyd den Sauerstoff entzieht, und auf diese Weise Schweißungen von Rohren, Stäben, Schienen u. s. w. sehr leicht hergestellt werden können. Bei schon vorhandenen Schienengeleisen schraubt man die Schienenenden mit Klammern fest (Fig. 18), so daß sie sich in etwa 10 *mm* Entfernung voneinander befinden, umgibt den Schienenstoß mit entsprechenden Formen aus feuerfestem Ton, umstampft die Formen mit feuchtem Sand und setzt dann auf einen eisernen Dreifuß einen gleichfalls mit feuerfestem Ton ausgekleideten trichterförmigen eisernen Schmelztiegel. Die Fig. 19 zeigt das Schweißen nach diesem Verfahren in dem Augenblick, wo ein Arbeiter das Gemisch in dem Tiegel angezündet hat und dasselbe unter lebhafter Rauch und Glutentwicklung zu schmelzen beginnt. Für eine derartige Schienenverbindung sind etwa 10 *kg* Thermit erforderlich, die bereits fertig abgewogen sich in Säcken befinden. Der Schmelztiegel wird über eine seitliche Einflußöffnung gesetzt, unten mit Asbest und einer dünnen Eisenscheibe geschlossen und das Thermit alsdann hineingeschüttet. Über der Einflußöffnung in der Chamotteform liegt ein flacher Hebel (Fig. 20) mit einem eisernen Stoßbolzen, durch welchen man im richtigen Augenblick die geschmolzene Masse zum Abfließen bringt, indem man den Hebel mit einem Stoßbolzen in die Höhe drückt und hierdurch das

Fig. 16. Schienenverbinder.

etwa noch nicht geschmolzene Eisenplättchen mit der Asbestunterlage durchstößt und den Hebel schnell zur Seite dreht, wie dies in Fig. 18 und 20 dargestellt ist.

Das ganze Verfahren ist derartig einfach, daß es von jedem Arbeiter leicht erlernt werden kann, und

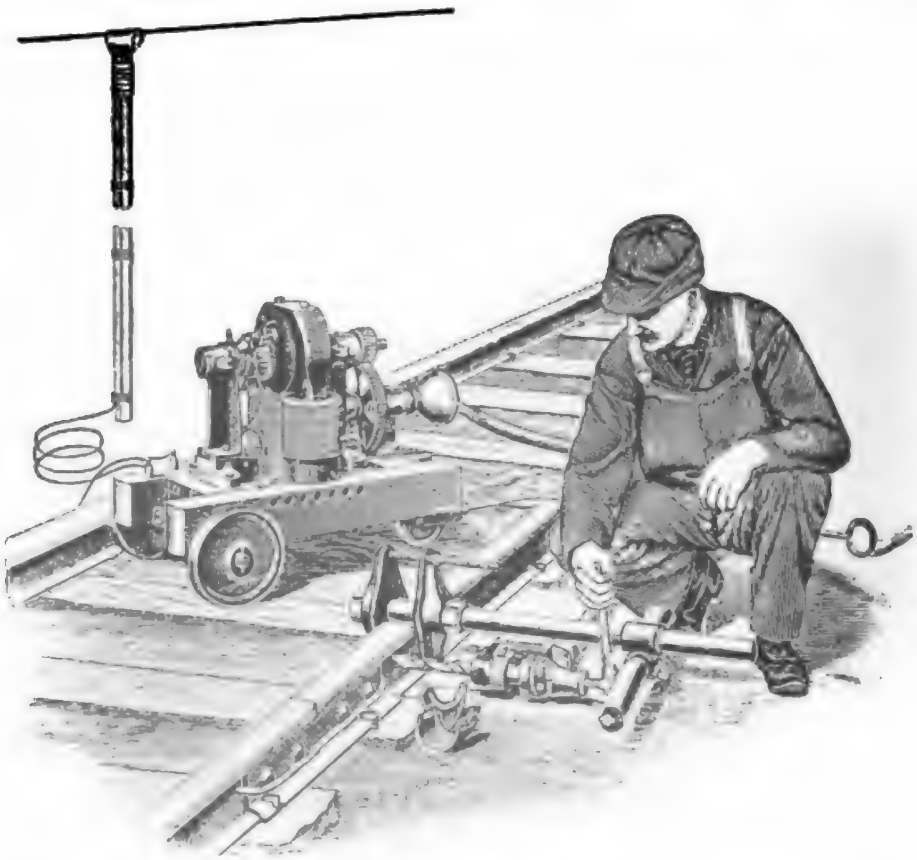


Fig. 17. Anbohren der Schienen für den kupfernen Verbinder.

es kostet nicht mehr, unter Umständen sogar weniger, als die gewöhnliche Laschenverbindung. Die Herstellung einer solchen Schweißstelle, das Zusammenschrauben und Anbringen der Form, Aufstellen des Tiegels und das Schmelzen dauert für jede Schweißstelle nicht mehr wie etwa eine halbe Stunde und läßt sich bei neuen Geleisen wohl auch noch in kürzerer Zeit vornehmen.

Digitized by Google

Auch bei diesem Verfahren findet eine äußerst innige Verschweißung der Schienenenden statt, die ähnlich, wie bei dem Falkschen Verfahren, mit einem Eisenklumpen, jedoch von etwas geringeren Abmessungen umgeben sind. Beide Verfahren, sowohl nach

Fig. 18. Schienenschweißen mit Thermit.

dem Patent Falk, wie nach Dr. Goldschmidt sind bezüglich ihrer Festigkeit und Leitfähigkeit wohl ziemlich einander gleichwertig, jedoch das Schweißen mit Thermit ist einfacher und billiger. Die bisher damit gemachten, zahlreichen Schweißversuche bei Straßenbahnen haben durchaus befriedigt und sind von 100 angelegten Schweißstellen nicht mehr wie etwa 1—2 im späteren Betriebe reparaturbedürftig geworden.

Digitized by Google

2. Die Leitungsanlagen.

Allgemeines.

Wir unterscheiden bei den Leitungsanlagen für die Stromzuführung der elektrischen Kraft die Speiseleitungen und die Arbeitsleitungen. Die Speiseleitungen bestehen im allgemeinen in unterirdisch verlegten Kabeln, welche die elektrische Energie derartig den Arbeitsleitungen zuführen, daß selbst bei starkem Verkehr, also größerem Stromverbrauch, möglichst gleichbleibende Spannung von durchschnittlich 500 Volt in allen Punkten eines Straßenbahnsystems erreicht wird.

Es ist eine große Schwierigkeit und mehr einem glücklichen Griff und einer allgemeinen Erfahrung überlassen, wo man die Speisepunkte für die Zuführung der Kraft anzubringen hat und welchen Querschnitt die Kabel erhalten müssen. Bei den Hochbahnen, Untergrundbahnen, oder auch bei Vorortebahnen ist man eher in der Lage, durch Rechnung auf Grund eines graphischen Fahrplanes den Stromlauf für jeden Augenblick des Betriebes zu berechnen, während man bei den Flachbahnen, die in den Straßen selbst verkehren, eine den wirklichen Verhältnissen angemessene Rechnung kaum durchführen kann, weil nämlich durch mancherlei Vorkommnisse oft und leicht eine größere Ansammlung von Straßenbahnwagen eintreten kann, und zwar an Punkten, die sich niemals voraussehen

lassen und infolgedessen an diesen Punkten unvermutet hohe Stromstärken erforderlich werden. Derartige Vorfälle werden z. B. veranlaßt durch einen auf den Geleisen zusammengebrochenen Lastwagen, der den ganzen Verkehr für längere oder kürzere Zeit behindern kann. Die Wagen müssen in diesem Falle entweder so lange warten, bis das Hindernis beseitigt ist, oder sie müssen auf Umwegen nach anderen Linien in andere Straßen abgelenkt werden. Eine andere Betriebsstörung und Anhäufung von Wagen kann dadurch eintreten, daß an den Speisepunkten etwa Hauptbleisicherungen der Kabel durchschmelzen und infolgedessen die Wagen einer Linie stehen bleiben müssen, während von den Seitenlinien die noch Stromzuführung haben, immer weitere Wagen hinzukommen.

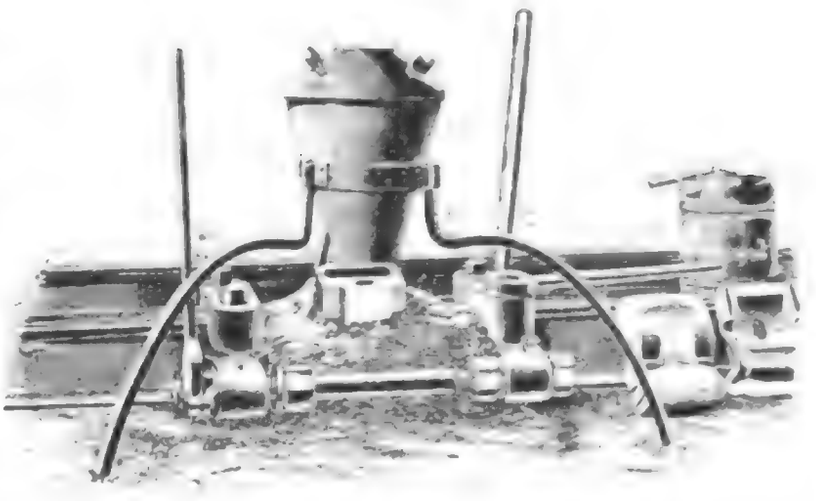


Fig. 19. Tiegel über der Form.

Bei Hochbahnen und Untergrundbahnen wird man naturgemäß die Kabel nicht in den Erdboden einbetten, sondern neben den Geleisen auf besonderen Trägern anbringen.

Die Arbeitsleitungen, welche den Strom aus den Verteilungs-, beziehungsweise Speiseleitungen dem fahrenden Wagen zuführen, bestehen bei Flachbahnen

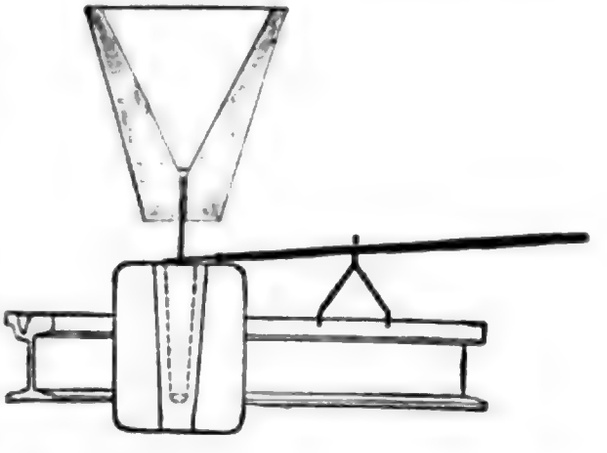


Fig. 20. Tiegel mit Ablaßvorrichtung.

lediglich in oberirdischen, mitten über den Geleisen angebrachten Hartkupferdrähten, die je nach Stärke des Verkehrs 6—11 *mm* Durchmesser erhalten. Im allgemeinen wendet man für die Arbeitsdrähte 8 *mm* starkes Hartkupfer an, das also rund 50 mm^2 Querschnitt hat. Um eine bessere Stromverteilung zu erhalten, und an Speiseleitungen zu sparen, pflegt man bei den kürzeren eingeleisigen Bahnen zwei Leitungen dicht nebeneinanderanzubringen, die für die beiden Fahrtrichtungen dem Wagen den Strom zuführen, so daß man also den doppelten Querschnitt für die Stromzuführung verfügbar hat und bei etwaigen Leitungsstörungen nur die eine Fahrtrichtung unter Umständen gestört sein wird. Bei zweigeleisigen Straßenbahnen erhält naturgemäß jedes Geleise einen besonderen Fahrdraht von rundem oder 8-förmigem Querschnitt.

Fig. 21. Gerade Tragöse.

Fig. 22. Ankeröse.

Fig. 23. Speiseöse.

Fig. 24. Spleißöse.

Bei den Hoch- und Untergrundbahnen, die ja meistens bei starkem Verkehr mehrere Wagen in Zügen vereinigt haben, wendet man gewöhnlich nicht blanke Kupferdrähte als Arbeitsleitungen an, sondern eiserne Schienen etwa in Form und Größe wie die Vignolschiene der Eisenbahnen, von welchen durch besondere Kontaktvorrichtungen (Gleitschuhen) der

Strom dem Motorwagen zugeführt wird. Naturgemäß erfordert die ziemlich hohe Spannung von 500 Volt sorgfältige Isolierung der Leitungen vom Erdboden, die bei den oberirdischen Arbeitsdrähten in den Straßen gewöhnlich doppelt ausgeführt wird, indem man zunächst den Fahrdraht an einem besonderen Isolator befestigt, und diesen Isolator wieder durch einen kürzeren oder längeren Isolator aufhängt, der an seinen beiden Enden wiederum durch besondere Vorrichtungen isoliert ist.

Um etwaige Störungen durch Leitungsbruch, Blitzschlag, Schmelzen von Sicherungen u. dgl. möglichst einzuschränken, und um bei Veränderungen, Häuserbränden etc.

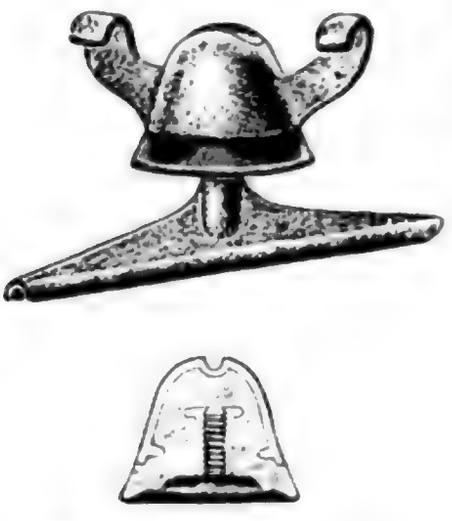


Fig. 25. Hängeisolator.

Fig. 26. Wagenschuppenisolator.

die blanken Arbeitsleitungen jederzeit schnell stromlos machen zu können, pflegt man den Arbeitsdraht in Abständen von etwa 500—1000 *m* durch besondere Einrichtungen (Sektionsösen oder Sektionsschalter) zu teilen, indem man innerhalb des Fahrdrahtes einen Sektionsschalter einsetzt, der in einem besonderen Kästchen an der Wand des nächsten Hauses oder an einem Pfosten angebracht ist.

Wo verschiedene Strecken oder die Leitungen verschiedener Ösen, beziehungsweise von verschiedenen Kraftwerken zusammentreffen, werden ähnliche Sektionsösen oder auch Streckenisolatoren in den Arbeitsdraht

eingefügt, damit zwar die Wagen ungehindert von einer Strecke auf die andere übergehen können, jedoch die Stromzuführung stets getrennt bleibe.

Die Anbringung der Arbeitsleitungen bei Hoch- und Untergrundbahnen, beziehungsweise bei Vorortebahnen, welche mehr oder minder den Eisenbahnen nachgebildet sind, macht keine besonderen Schwierigkeiten, während die Arbeitsleitungen der Straßenbahnen, welche im Straßenniveau fahren, jedoch in ganz eigenartiger Weise aufgehängt und befestigt werden müssen, damit die Stromzuführung ohne Hindernis von statten gehen könne.

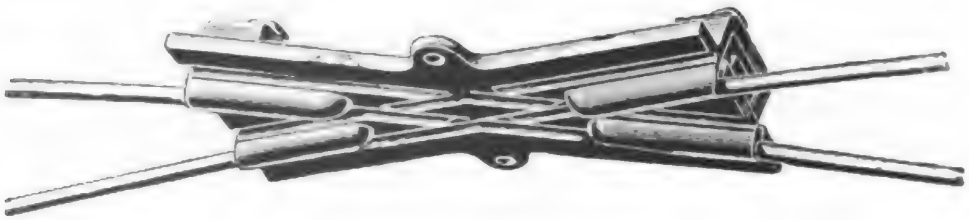


Fig. 27. Feste schräge Kreuzung.

Der den Strom aus den Arbeitsleitungen abnehmende und später zu beschreibende Kontakt berührt die Arbeitsleitung auf seiner unteren Hälfte, so daß sämtliche Arbeitsdrähte nicht wie bei den Telegraphenleitungen auf Porzellanisolatoren festgebunden werden können, sondern sie müssen möglichst mitten über dem Geleise freischwebend aufgehängt werden und zwar gewöhnlich in einer Höhe von 5—6 *m*. Auch soll die Höhe über den Schienen innerhalb eines Straßenbahnbezirks überall möglichst die gleiche Höhe haben, damit die Stromentnahme unter möglichst gleichen Verhältnissen stattfinden kann.

Für diese Zwecke hat man infolgedessen ein besonderes Leitungssystem ersonnen, das wir nachstehend näher beschreiben wollen.

Die Tragkonstruktion der Oberleitung.

Da die Arbeitsdrähte im allgemeinen mitten über den Geleisen sich befinden müssen, so ist man genötigt, sie an Queraufhängungen, d. h. an 4—6 *mm* starken verzinkten Stahldrähten oder Stahldrahtseilen aufzuhängen. Diese Querdrähte befestigt man entweder an seitwärts der Straße aufgestellte Pfosten, an Wandplatten mit Haken oder Wandrosetten, die man an den Wänden der Häuser anbringt, oder man wählt unter Umständen auch Auslegerbefestigung, indem man einerseits oder an der Mitte der Straße mehr oder minder dekorativ gehaltene Säulen aufstellt, die

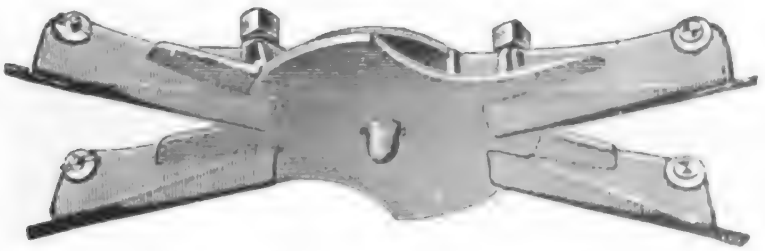


Fig. 28. Verstellbare Kreuzung.

einerseits oder beiderseits Ausleger erhalten, an welchen man die Querdrähte, die in letzterem Falle kürzer gewählt werden können, als wenn sie über die ganze Straße zu spannen sind, isoliert befestigt.

Als Isoliermaterial für diese Oberleitungen kann man im allgemeinen Porzellanisolatoren, wie man sie sonst für Lichtleitungen oder Telegraphenleitungen anwendet, nicht gebrauchen, sondern man hat für diese Zwecke Isoliermaterialien hergestellt, welche ein möglichst hohes Isoliervermögen besitzen, jedoch sehr zähe und nicht so brüchig wie Glas oder Porzellan sind und dabei eine bedeutende mechanische Festigkeit besitzen. Zu diesen Materialien gehört zum Beispiel das Ambroin, oder eine Mischung von Asbest mit Harzen, Hartgummi, vulkanisierbarem Gummi

Digitized by Google

u. dgl. Das Material muß naturgemäß auch gegen die Einflüsse der Witterung unempfindlich sein und vor allen Dingen keine Feuchtigkeit annehmen, da in diesem Falle das Isoliervermögen unter Umständen bedeutend herabgemindert werden könnte.

Die Oberleitungen.

Das Material für die Befestigung und Isolierung der Oberleitungen, welche als Arbeitsdrähte für die Stromzuführung dienen, ist, wie gesagt, entsprechend der Verwendungsart der Leitungen ganz abweichend von den sonst üblichen Konstruktionen elektrischer Leitungen eingerichtet. Der 6—8*mm* starke Arbeitsdraht wird gewöhnlich alle 38 bis 40 *m* unterstützt, beziehungsweise aufgehängt und nur in Krümmungen sind Unterstützungen in geringeren Abständen erforderlich. Die Befestigung des Arbeitsdrahtes geschieht im allgemeinen durch Anlöten, bei einigen Fabrikaten auch durch Verschraubung zwischen geteilten, entsprechend gekrümmten Backen.

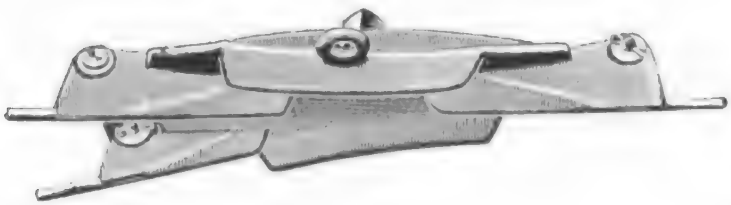


Fig. 29. Rechtsweiche für Fahrdrähte.

Fig. 30. Linksweiche.

Die gerade Tragöse für das Anlöten des Fahrdrahtes ist in Fig. 21 dargestellt. Da in Abständen von 300—500 *m* der gerade ausgespannte Draht verankert werden muß, so gebraucht man für diese

Digitized by Google

Zwecke die Ankerösen (Fig. 22). Für die Stromzuführung in den Speisepunkten dient eine Speiseöse (Fig. 23), nach welcher an besonderen Porzellan-Isolatoren oder Porzellan-Rollen mit wettersicherer Bespinnung umgebene Leitungen auf dem Hängedraht entlang nach der Speiseöse geführt werden. Da der Arbeitsdraht in verschiedener Länge geliefert wird, die höchstens 1·5 *km* beträgt (siehe die Lieferungsbedingungen), so sind auch Spleisösen (Fig. 24) erforderlich, an denen die Enden umgebogen und ver-

Fig. 31. Y-Weiche für zwei Abzweigungen.

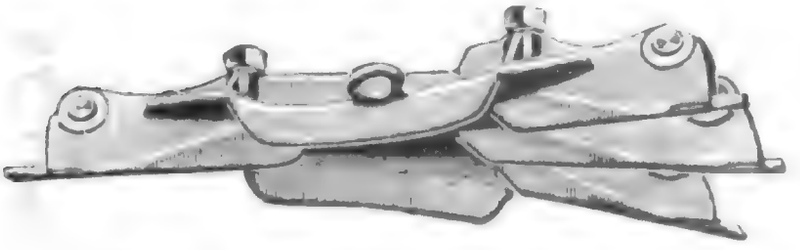


Fig. 32. Weiche für drei Abzweigungen.

lötet werden. Um in gerader Strecke, wo keine Öse vorhanden ist, gleichfalls die Enden des Arbeitsdrahtes verbinden zu können, hat man besonders gestaltete, einer Zigarre etwa ähnliche Schraub- oder Lötmuffen angewendet.

Die Befestigung der soeben beschriebenen Ösen, die oben einen Stutzen mit Gewinde haben, geschieht an sehr verschieden gestalteten Isolatoren, die teils am Querdraht aufgehängt werden, wie der Hänge-Isolator (Fig. 25), teils an Deckenbalken o. dgl. verschraubt werden, wie der Wagenschuppenisolator (Fig. 26).

Außer diesen Trag- und Isoliervorrichtungen sind auch noch besondere Vorrichtungen für Kreuzungen und abzweigende Linien erforderlich, so zeigt z. B. Fig. 27 eine feste schräge Kreuzung und Fig. 28 ein verstellbares Kreuzungsstück, das je nach dem Winkel, unter welchem zwei Linien sich kreuzen bis zu 90^0 eingestellt werden kann.

Entsprechend den Schienen-Weichen erfordert der Fahrdraht naturgemäß auch Luftweichen, die so angelegt werden müssen, daß die Kontaktrolle rechtzeitig die Weiche passiert, wenn der Wagen sich in der Schienen-Weiche befindet. Derartige Luftweichen sind in den nachstehenden Fig. 24—32 abgebildet. Es zeigt z. B. Fig. 29 eine Rechtsweiche, Fig. 30 eine Linksweiche. Für zwei abzweigende Richtungen aus gerader Strecke dient die Y-Weiche (Fig. 31), während für drei aus gerader Strecke abgehende Zweige die Weiche Fig. 32 gebraucht wird.

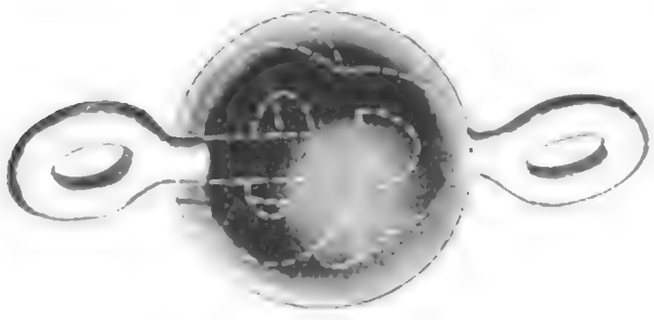


Fig. 33. Kugelisolator.

Um die Isolation der elektrischen Fahrdrähte einerseits zu erhöhen und anderseits auch bei etwaigen Arbeiten, Reparaturen, Änderungen u. dgl. während des Betriebes, also unter Strom, die Arbeiter vor Beschädigungen und elektrischen Schlägen zu schützen, hat man allgemein doppelte Isolierung der Arbeitsdrähte angewendet, nämlich einmal durch den Isolator, welcher die Tragöse festhält und dann durch besondere Isolierung beiderseits an den Hängedrähten. Für diese Zwecke hat man je nach Umständen und Bauart verschiedene Einrichtungen getroffen. Entweder gebraucht man hierzu einfache Rollen aus Perenit,

ähnlich wie flache Porzellanrollen gestaltet oder an gewissen Stellen auch Kugelisolatoren (Fig. 33) und bei Aufhängung des Fahrdrahtes an Wandplatten besonders gestaltete Isolatoren mit Schalldämpfern, damit das Geräusch des Stromabnehmers während des

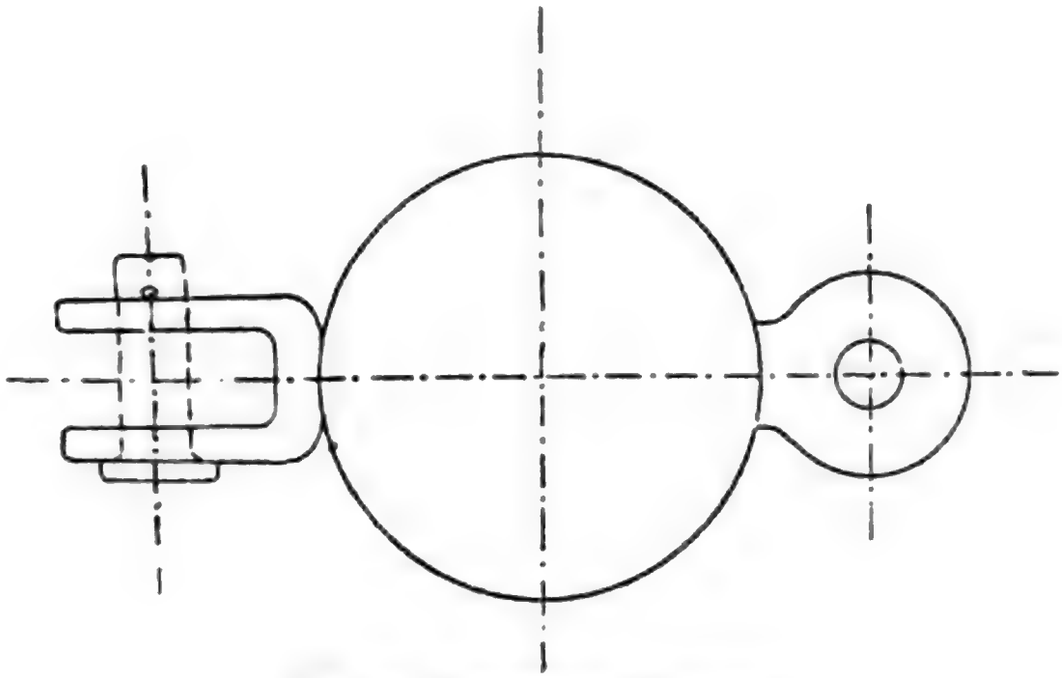


Fig. 33a. Kugelisolator (Schema).

Fahrens der Motorwagen sich nicht störend in den Wohnungen bemerkbar macht. Bei Aufhängung des Fahrdrahtes an Masten ist außerdem vielfach noch das in Fig. 34 abgebildete Spannschloß im Gebrauch, bei welchem nachträgliches Anspannen des Hängedrahtes möglich ist.

Fig. 34. Spannschloß am Mast.

Da die verhältnismäßig hohe elektrische Spannung der Oberleitungen von 500 Volt den sie kreuzenden Schwachstromleitungen, insbesondere den Telephondrähten gefährlich werden kann, indem beim Reißen der Leitung ein Draht auf die Oberleitung

fallen könnte, so hat man allgemein besondere Schutzvorrichtungen gegen diese Gefahr eingeführt (siehe die Vorschriften bei Telegraphenbehörden, welche später mitgeteilt sind). Man spannt zu diesem Zwecke entweder Schutznetze, unter die Schwachstromleitungen oder bringt einen geerdeten Schutzdraht etwa 30 *cm* über der Oberleitung nach dem System Siemens & Halske an. Sehr viel in Gebrauch ist auch die in Fig. 35 in Ansicht und Querschnitt dargestellte Schutzleiste, die aus imprägniertem Holz oder geeignetem Gummimaterial besteht und durch kleine auf die Drähte festgelötete messingene Reiter festgehalten wird.

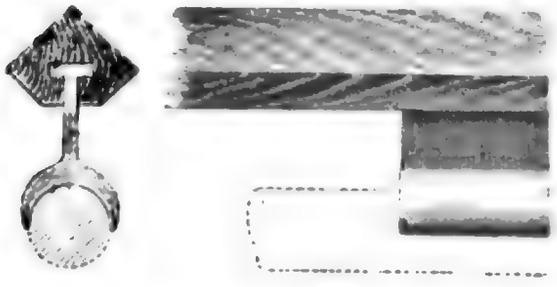


Fig. 35. Schutzleiste.

Übersicht der Oberleitungsteile.

Die oberirdische Streckenausrüstung besteht nach dem Gesagten aus der Tragkonstruktion und den Fahrdrähten. Die Tragkonstruktionen für die Fahrdrähte werden durch Querdrähte gebildet, die an gewissen Unterstützungen, Masten, Auslegern, Gebäuden befestigt sind. Jeder Fahrdraht ist an seinen beiden Enden oder auch nochmals in der Mitte je nach Umständen zu isolieren, an Gebäuden werden auch Schalldämpfer angebracht und der Fahrdraht hängt an besonders gestalteten Isolatoren, die von den Querdrähten getragen werden.

Für Rollenkontakte pflegt man gewöhnlich den Fahrdraht anzulöten, für den Bügelkontakt ist vielfach eine Verschraubung in Gebrauch. Nachstehend ein Verzeichnis der hauptsächlichsten Teile für Oberleitungen:

1. Allgemeine Oberleitungsteile. Wirbelisolator mit Spannvorrichtung, Wirbelisolator mit langem Spannschloß, Halter für gerade Strecken, Kurvenhalter, Kurventräger, doppelter Kurvenhalter, doppelter Kurventräger, Kurventräger mit Kugelisolatoren, Deckenhalter, Verankerungsstücke, Drahthalter zum Klemmen mit Anschlußputzen, Drahthalter zum Löten, Drahthalter zum Löten mit Anschlußputzen, Drahthalter zum Löten für Kabelanschlüsse. Drahthalter für Drahtverbindungen, Drahthalter mit Verankerungsösen, Kurvenspanner für Bügelkontakt.

2. Weichen und Kreuzungen. Luftweiche zum Löten, Luftweiche zur mechanischen Betätigung, Luftweiche für Bügelkontakt, verstellbare Kreuzung, feste rechtwinkelige Kreuzung, verstellbare isolierte Luftkreuzung.

3. Besondere Materialien, Schalldämpfer, Verbindungsmuffe zum Löten, Verbindungsmuffe zum Schrauben, Kurvenösen, Streckenisolator, Streckenisolator mit Funkenunterbrechung, Drahtbefestigung an Rohren, Auslegern.

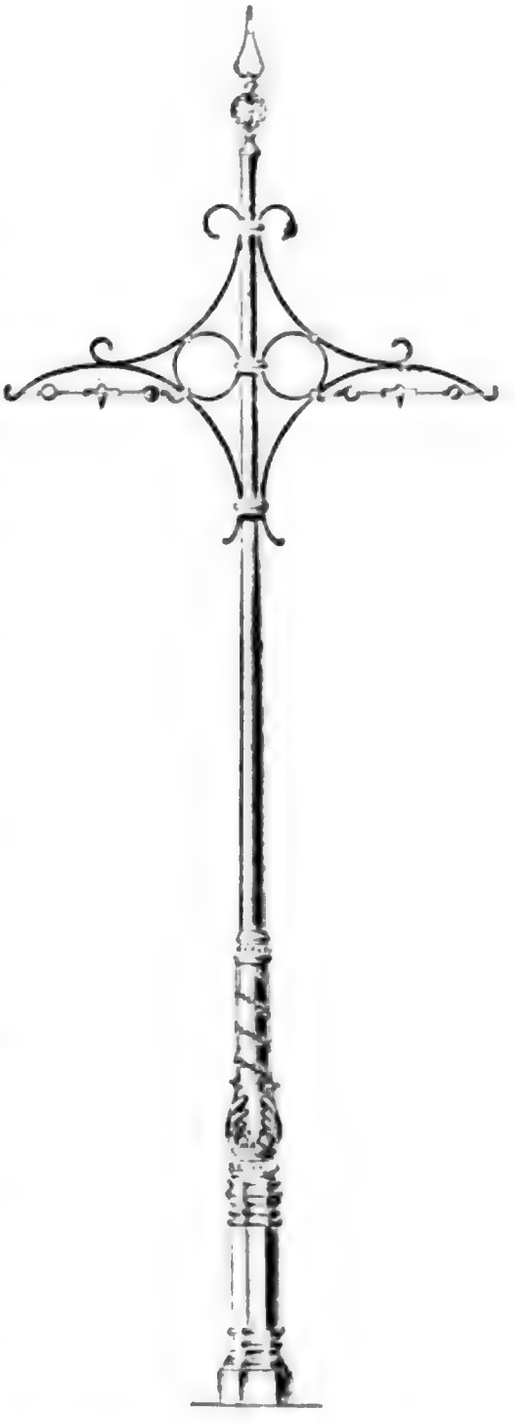


Fig. 36. Verzierter eiserner Mast.

4. Isolatoren. Isolator für Hängeösen, für Spanndrähte, Doppelisolator, Kugelisolator bis zu 3600 *kg*

Fig. 37. Liverpooler Maste.

Digitized by Google

Zugfestigkeit, Kugelisolator bis zu 2500 *kg* Zugfestigkeit, Kugelisolator für Weichen, Kurvenösen mit Kugelisolator, Rollenisolatoren zur Drahtbefestigung an Klemmenauslegern (Perenitrollen).

Fig. 38. Doppelter Ausleger für vier Drähte.

5. Schienenverbinder. Schienenverbinder »Chicago«, Schienenverbinder »Columbia«, Schienenverbinder, »Berlin«.

Konstruktion der Unterstützungen.

Wie wir schon erwähnt haben, bestehen die Unterstützungen der Arbeitsleitungen aus Masten mit Queraufhängung, einseitigen oder beiderseitigen Auslegern. Wo man jedoch zwischen Häusern Gelegenheit hat, die Masten zu ersparen, verankert man die Querdrähte

an Wandplatten, die man in dem Mauerwerk der Gebäude befestigt.

Die Länge der Masten, beziehungsweise die Höhe,

Fig. 39. Verzierter Mast mit doppeltem Ausleger für zwei Drähte.

in welcher der Hängedraht anzubringen ist, richtet sich einmal nach der überall möglichst gleichen Höhe des Querdrahtes über der Schienen-Oberkante, die, wie

Digitized by Google

schon erwähnt, 5·5 *m* oder 6 *m* beträgt und im übrigen nach der Entfernung des Befestigungspunktes des Querdrahtes von dem zu tragenden Arbeitsdraht.

Die Neigung dieser Quer-, beziehungsweise Hängedrähte beträgt auf den laufenden Meter nicht mehr als 10 *cm* und hieraus ergibt sich also die erforderliche Höhe der Masten, beziehungsweise der Wandplatten. Je weiter ab also der Befestigungspunkt des Hängedrahtes sich von dem Arbeitsdraht befindet, um so höher muß der Mast sein oder der Anbringungspunkt der Wandplatten liegen.

Fig. 40. Auslegermast für Dickinsonsystem mit einem Draht.

Im allgemeinen kommt man für diese Zwecke mit Masten von 9—12 *m* Länge aus, welche man 1·7 — 2 *m* in den Erdboden einsenkt. Um den Stützen oder Säulen die genügende Stabilität zu geben, pflegt man sie in ein trichterförmiges Loch zu setzen, das man mit Steinen, Beton o. dgl. sorgfältig ausfüllt.

Bei leichteren Gittermasten, die man nicht in dieser Weise ummauern will oder kann, pflegt man eine größere Standfestigkeit dadurch zu erreichen, daß man Wellblechstücke seitwärts einnietet oder festbindet.

Digitized by Google

welche die Druckflächen gegen den Erdboden vergrößern und hierdurch die erforderliche Standfestigkeit des Mastes gewähren.

Sehr hohe Masten, etwa über 15 *m* Länge, pflegt man aus verschieden geformten Walzeisen als Gittermasten von quadratischer oder rechteckiger Form herzustellen. Auch werden nach besonderem Verfahren gewalzte Rohre hergestellt, die wie bei dem Mannesmann-Verfahren ohne Naht in Absätzen gewalzt werden, während andere Fabriken eine oder vier Walznähte anwenden und die Rohre in konischer Form ohne Absatz herstellen.

Fig. 11. Auslegermast für Dickinsonsystem mit zwei Drähten.

Holzmasten werden nur sehr selten und in kleineren Ortschaften gebraucht. Sie haben gewöhnlich selbst bei imprägniertem Holz keine größere Dauer als etwa 10—12 Jahre, während die eisernen Masten bei sorgfältigem Anstrich gegen Rosten mindestens 50 Jahre gebrauchsfähig bleiben und die flachen Gittermasten gewöhnlich nicht viel teurer kommen als gut imprägnierte starke Holzmasten. In großen Städten verwendet man neuerdings guß-

eiserne Hohlrohr-Masten, von denen einige nachstehend abgebildet sind. Fig. 36 zeigt zum Beispiel einen dekorativ gehaltenen eisernen Rohrmast mit zwei seitlichen Auslegern für je einen Fahrdraht. Fig. 37 zeigt einen ähnlichen Mast, der in halber Höhe außerdem noch zwei Laternen trägt, wie dieselben zum Beispiel bei der städtischen Straßenbahn in Liverpool im Gebrauch sind.

Ein Mast mit doppeltem Ausleger für je zwei seitlich angebrachte Arbeitsdrähte ist in Fig. 38 dargestellt, nach der Konstruktion in Dublin.

Besonders dekorativ gehaltenen Mast mit doppeltem Ausleger zeigt Fig. 39.

Die Anbringung der Arbeitsleitung seitwärts vom Geleise nach dem System Dickinson ist in Fig. 40 dargestellt. Einen besonders langen Ausleger mit zwei Arbeitsdrähten für ein Geleise und Wagen mit Dachsitzen gleichfalls nach dem System Dickinson zeigt Fig. 41.

Unterirdische Stromzuführung.

Um die Gefahren der Oberleitungen zu vermeiden und das Aussehen der Straßenbahnen nicht zu stören, hat man schon seit Jahren mehrfach auch unterirdische Stromzuführungen konstruiert und in der verschiedensten Weise ausgeführt. Im allgemeinen hat sich bis jetzt jedoch nur das System mit Schlitzkanal bewährt, während die sogenannten Knopfsysteme mit Teilleitern, bei denen die Leitungen völlig abgeschlossen liegen, bisher wenig Aussicht auf praktische Brauchbarkeit gegeben haben. Im größeren Maßstabe ist hauptsächlich die Siemens'sche Konstruktion in Anwendung gekommen, die sich seit Jahren sowohl in Budapest wie in Berlin als durchaus betriebstüchtig erwiesen hat.

Die Einrichtungen dieser Unterleitung von Siemens & Halske sind folgende*):

Die eine Schiene, in der einen Fahrtrichtung gewöhnlich links in der anderen rechts, bildet einen 30 *mm* breiten Spalt, unter welchem sich ein ovaler Kanal von 340 *mm* Weite und 450 *mm* Höhe befindet (Fig. 42); derselbe ist in der Weise hergestellt, daß

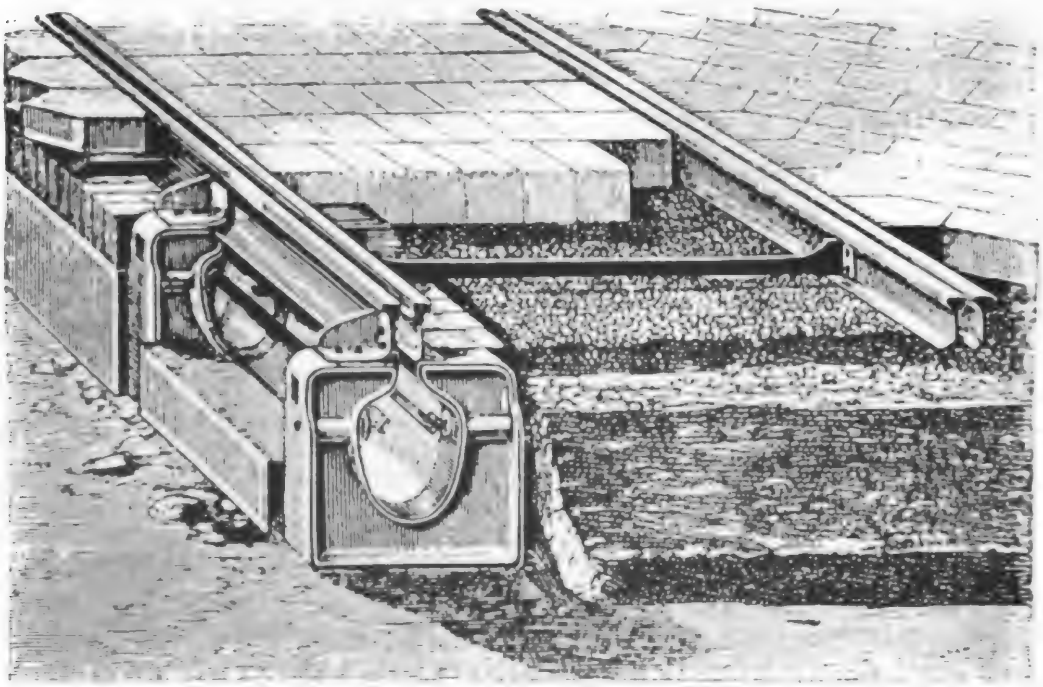


Fig. 42. Unterleitung.

man etwa alle 2 *m* gußeiserne Rahmen aufgestellt hat, auf welchen oben die geteilte Doppelschiene (System Haarmann) festgeschraubt wird. Der Kanal wird in der Weise hergestellt, daß man in der ovalen Form, die er bekommen soll, Schalbretter befestigt und um dieselben in viereckiger Form Beton stampft, so daß ein fortlaufender Kanal gebildet ist. Um das sich etwa ansammelnde Tagwasser abzuleiten, wird an geeigneten Punkten der Kanäle dasselbe in Schächten gesammelt

*) S. a. Elektrot. Zeitschrift 1898, Heft 38.

Digitized by Google

und entweder nach der Kanalisation, nach einem fließenden Gewässer oder sonst geeignetem Graben abgeführt.

Die Arbeitsleitungen bestehen aus schwachen T-förmigen Schienen, die an besonderen Isolatoren festgeschraubt sind. Alle 2 *m* befindet sich unter einem abnehmbaren Verschlußdeckel ein Isolator, der in diesem Falle aus starkem Porzellan gebildet ist. Die Einrichtung ist derartig getroffen, daß man nach Herstellung des Kanals die Arbeitsleitungen einbringen und befestigen kann; auch ist es möglich, Reparaturen daran zu machen oder einzelne Stücke auszuwechseln und zwar lediglich von den alle 2 *m* befindlichen Handlöchern aus. Die Arbeitsleitungen sind beiderseits im Kanal derartig angebracht, daß sie weder von oben sichtbar sind, noch mutwillig leicht berührt werden können. Der Stromabnehmer, der an anderer Stelle beschrieben ist, wird vom Wagen aus in den Schlitzkanal hinabgesenkt und berührt mit zwei Kontaktplatten die beiderseits gelegenen Arbeitsleitungen.

In Berlin hat man besonders komplizierte und kostspielige Anlagen an gewissen Stellen mit Unterleitung errichtet, um den bisher teilweise vorhandenen Akkumulatorenbetrieb (gemischten Betrieb) zu beseitigen, ohne daß man Oberleitungen, die sonst in den Straßen vorhanden sind, anzulegen genötigt war, so daß man einen gemischten Betrieb mit Oberleitung und teils mit Unterleitung nunmehr eingeführt hat. Derartige Strecken sind z. B. vor dem Brandenburger Tor, bei Überschreitung der Straße Unter den Linden in Berlin und vor dem Charlottenburger Schloß angelegt worden. Die Weichenanlagen werden an diesen Stellen von besonderen Weichenstellern bedient, da sie vom Wagen aus, wie dies sonst bei Straßenbahnen üblich ist, nicht gestellt werden können.

Hülfsgeräte.

Die eigenartige Konstruktion der Unter- und Oberleitungen auf Straßenbahnen erfordert naturgemäß auch besondere Geräte und Werkzeuge für deren Herstellung.

Fig. 43. Montagewagen der Halle'schen Straßenbahn.

Hierzu gehören vor allen Dingen Montagewagen der verschiedensten Konstruktionen, Drahtwagen, Haspelkarren, von denen man sowohl den bronzenen Fahrdraht als auch den stählernen Hängedraht nach Be-

Digitized by Google

darf abwickelt. Einzelne Straßenbahn-Gesellschaften kombinieren auch wohl die Montagewagen mit den Drahthaspeln oder sie wenden einen besonderen Haspelwagen an, der nicht von Menschen gezogen, sondern von Pferden fortbewegt wird, wie dies auch bei den Montagewagen üblich ist.

Fig. 43 stellt einen Montagewagen der Halleschen Straßenbahn dar, bei welchem eine Doppelleiter angebracht ist, zwischen welcher ein Zelt mit den erforderlichen Werkzeugen befestigt ist.

Da jedoch für viele Zwecke, besonders bei Arbeiten während des Betriebes, Wagen mit seitlich überragender Plattform und auch von verschiedener Höhe erforderlich werden, so hat man die verschiedenartigsten Konstruktionen für diese Zwecke hergestellt.

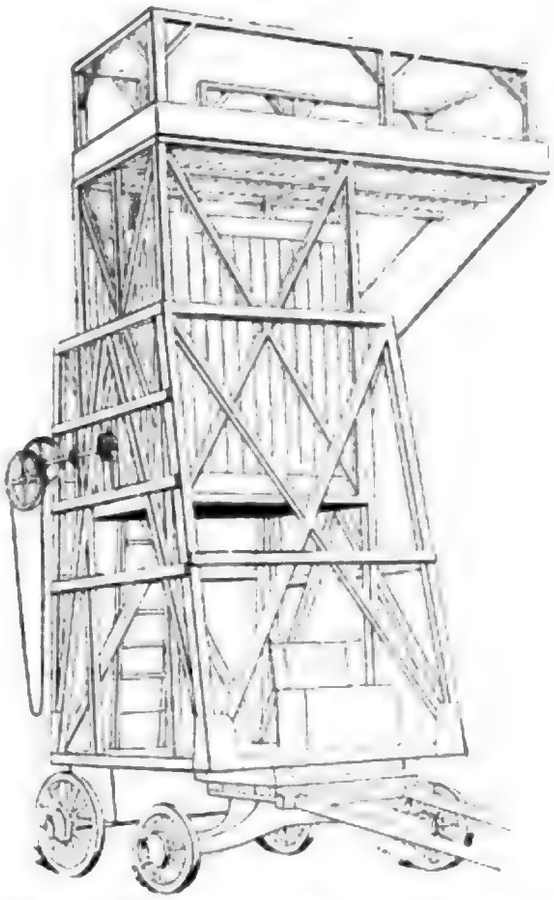


Fig. 44. Montagewagen der Union Elektrizitäts-Gesellschaft.

Fig. 44 stellt einen vielgebrauchten Montagewagen (Turmwagen) der Union Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin dar, bei welchem die Plattform durch ein Räderwerk und Drahtseile in verschiedene Höhe gestellt werden kann. Seitwärts sind Stützen vorhanden, welche der Plattform besondere Festigkeit geben.

Eine ähnliche Konstruktion, jedoch einfacherer und leichterer Bauart, zeigt Fig. 45. Die Plattform wird hier durch vier eiserne Röhren getragen, welche

in Ecksäulen geführt werden. Die Höhenlage wird durch eine Schraubenspindel in der Mitte verändert. Die Plattform bildet zwei Teile, so daß der überragende Teil nach Entfernen des Geländers hochgeklappt werden kann und dieselbe beim Transport des Wagens kein Hindernis bildet. Derartige Wagen sind zum Beispiel bei der Thorner Straßenbahn im Gebrauch. Eine ganz ähnliche Konstruktion, jedoch ohne verstellbare Plattform, zeigt Fig. 46.

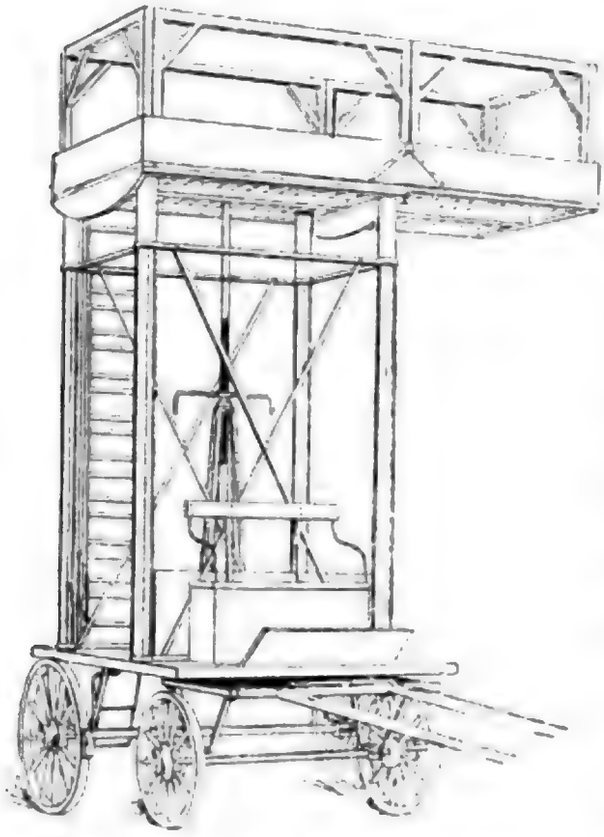


Fig. 45. Montagewagen der Thorner Straßenbahn.

Die Konstruktion Fig. 47 der Dresdener Straßenbahn hat zwar eine in ihrer Höhenlage verstellbare, doch seitwärts nicht hervorstehende Plattform.

Allen diesen Konstruktionen gemeinsam ist gewöhnlich die Anbringung eines Werkzeugschrankes und eines Werkzeugkastens, der vielfach zugleich Kutschersitz ist. Außerdem pflegt man die Plattform von dem Wagenuntergestell, falls dies aus Eisen besteht, vollkommen elektrisch zu isolieren, damit bei Arbeiten während des Betriebes, bei denen also die Leitungen stets unter Strom stehen, die Arbeiter vor Beschädigungen und elektrischen Schlägen geschützt sind.

Für die Montage von Doppelleitungen, schweren Auslegern u. dgl. ist besonders in England der in Fig. 48 dargestellte Montagewagen im Gebrauch, dessen Anwendung während des Betriebes in Fig. 49 noch besonders dargestellt ist. Derselbe dient zugleich als Mannschaftswagen.

Die Charlottenburger Straßenbahn verwendet nach der Konstruktion von Siemens & Halske den in Fig. 50 dargestellten Montagewagen, bei welchem die Plattform sowohl in ihrer Höhe verstellbar, als auch nach allen Richtungen drehbar ist. Der untere Teil bildet einen verschlossenen Raum mit Werkzeugschrank und Materialregalen. Zum Besteigen der Plattform dient vorn eine eiserne Leiter, unter welcher der Kutscher sitzt. Hinten ist noch ein besonderer Schraubstock für den Gebrauch bei den Arbeiten angebracht.

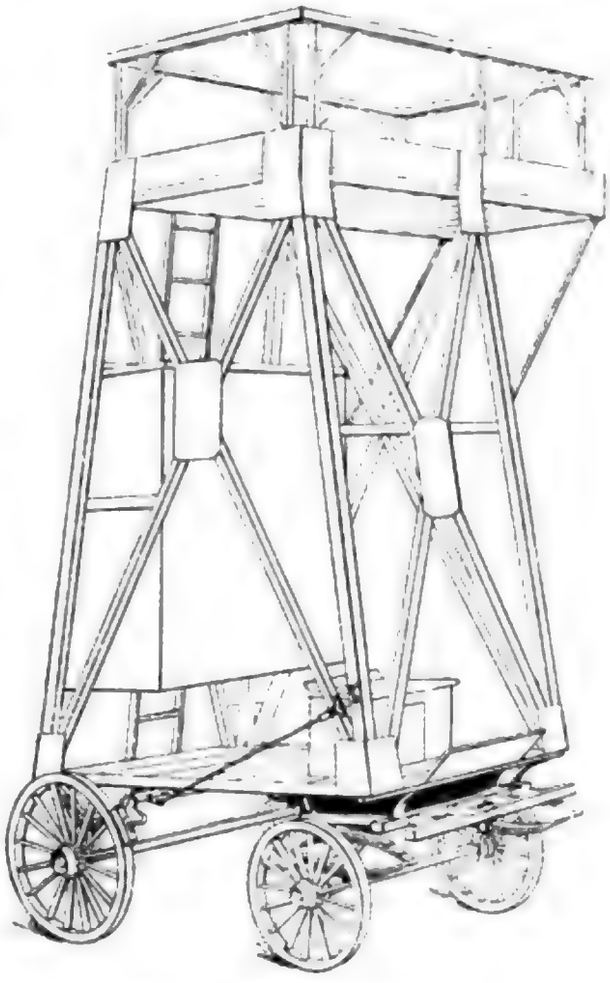


Fig. 46. Montagewagen mit fester Plattform mit Ausleger.

Große schwere Masten, wie sie zum Beispiel aus Mannesmann-Rohren in drei Absätzen aus einem Stück gewalzt werden, kann man nur unter besonderen Vorsichtsmaßregeln und Beihilfe von 8—10 Mann gewöhnlich aufrichten. Man verwendet daher auch vielfach den in Fig. 51 dargestellten Mastenkran. Derselbe hat auf dem hinteren Ende zwei Winden, von denen die eine dazu dient, den Ausleger in verschiedene Steigung nach vorn zu bringen, während die zweite Winde für das Hochwinden des Mastes angewendet wird, so daß wenig Leute ohne große Mühe selbst die schwersten und höchsten Säulen verhältnismäßig leicht handhaben können.

Zum Auf- und Abladen von Kabelrollen für unterirdische Leitungen u. dgl. dient der in Fig. 51a dar-

gestellte Kabelkran, welcher in der Weise gebraucht wird, daß man ihn an den Wagen, welcher zu Beladen oder Entladen ist, heranfährt und die Kabelrollen in einer ledernen Schleife oder in einem festen Handgurt mit dem Doppelhaken des Krans hochzieht. Zum Herablassen der Last dient eine einfache Handbremse, während das Hochwinden durch ein Zahnradvorgelege mit Kurbel bewirkt wird.

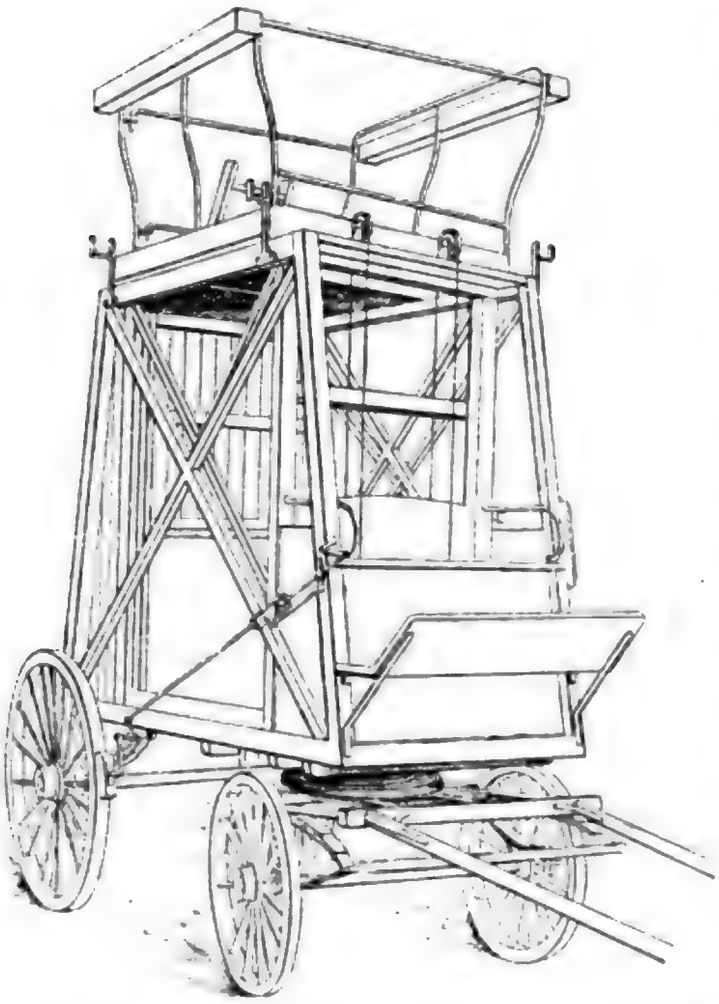


Fig. 47. Montagewagen mit stellbarer Plattform ohne Ausleger.

Die Montage der Verzierungen und Queraufhängen an hohen Masten kann mit gewöhnlichen Leitern nicht mit Sicherheit hergestellt werden und verwendet man infolgedessen vielfach Montageleitern nach Art der mechanischen Feuerwehrleitern, welche in der Fig. 52 dargestellt ist. Fig. 52 zeigt die vollständige Leiter, welche an ihrem oberen Ende einen Korb trägt, in welchem der Arbeiter sich mit Sicherheit bewegt. Die unteren Teile zur beliebigen Verlängerung der fahrbaren Leiter bis etwa zu 20 *m* Höhe sind in Fig. 53 besonders dargestellt. Je nach der verlangten Länge besteht die Schiebeleiter aus zwei bis drei ineinander gleitenden Teilen, welche durch eine Winde mit Drahtseil je nach Bedarf emporgehoben werden

können. Die Leiter ist so gebaut, daß sie vollständig frei tragend stehen kann. Sie hat jedoch zwei längere seitliche Stützen, die man nach Bedarf aufstellt, um

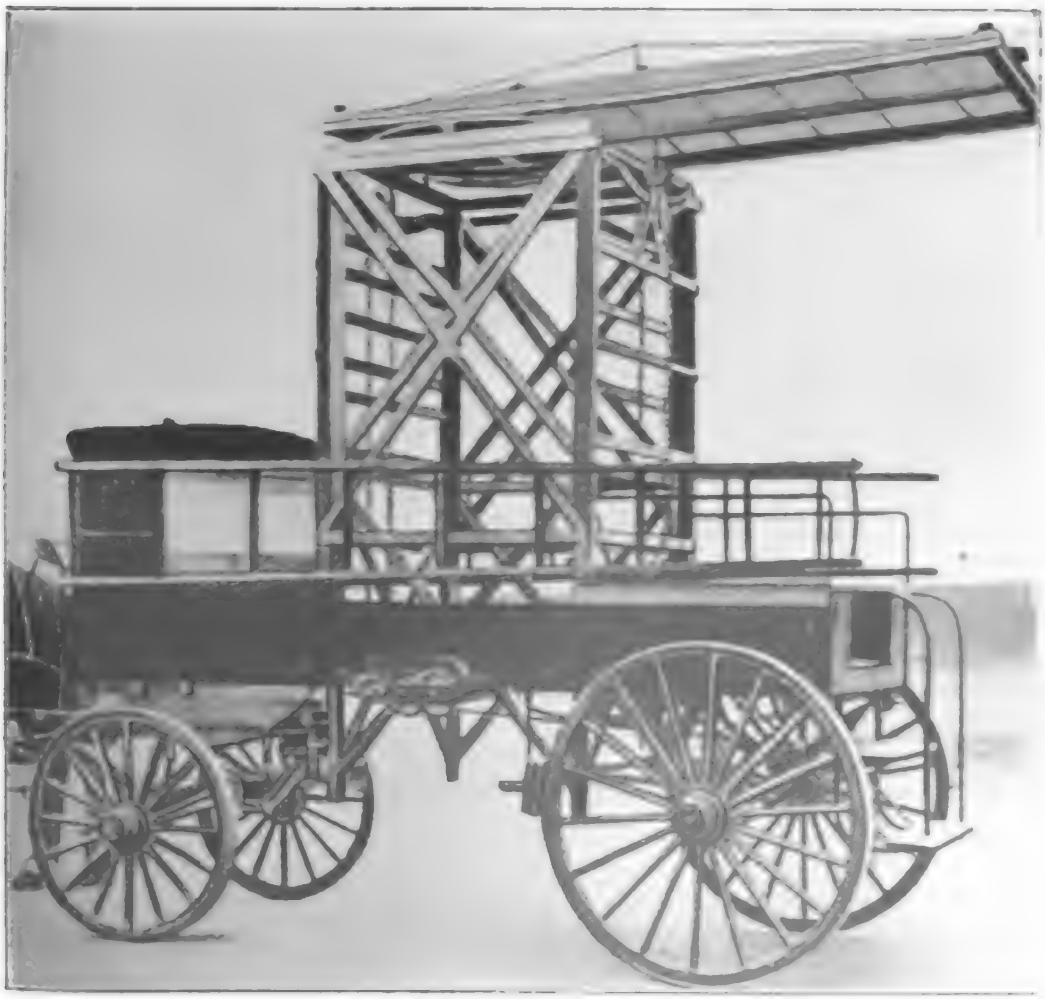


Fig. 48. Montagewagen englischer Bauart.

ihr bei schwierigen Arbeiten eine um so größere Standfestigkeit zu geben.

Ein vielfach gebrauchter Kabelkran, der besonders auch zum Abrollen des Fahrdrahtes gebraucht wird, ist in Fig. 54 abgebildet. Der Arbeitsdraht ist auf einer hölzernen Trommel in Länge von 1—2 *km*

Digitized by Google

sorgfältig schichtenweise und eine Windung neben der anderen aufgewickelt. Die Trommel wird mit Hilfe einer eisernen Achse in den Karren gelegt, der durch zwei Mann langsam fortbewegt wird.

Verhaltungsvorschriften für die an Montagewagen beschäftigten Personen.[1])

1. Die an einem Montagewagen beschäftigten Monteure, Arbeiter und Kutscher haben sich den Anordnungen des Montagewagenführers zu fügen.

2. Der Montagewagenführer hat dafür Sorge zu tragen, daß die Verhaltungsvorschriften pünktlich und strengstens innegehalten werden.

3. Die Monteure, Arbeiter und Kutscher haben pünktlich auf der Baustelle zu erscheinen.

4. Der Montagewagen muß nach Außerbetriebsetzung auf einem Orte aufgestellt werden, wo er dem Verkehr nicht hinderlich ist.

5. Wird der Montagewagen von oder zur Baustelle gefahren, so muß außer dem Kutscher stets ein Montagewagenbegleiter anwesend sein.

6. Die Plattform mit Überhang des Montagewagens muß stets herabgelassen sein, sobald der Turmwagen von oder zur Baustelle bewegt wird.

7. Alle Werkzeuge und Materialien sind in guter Ordnung zu halten und müssen stets unter Verschluß bleiben, wenn sie nicht gebraucht werden.

8. Der Montagewagenführer haftet für alle am Wagen befindlichen Werkzeuge.

9. Die am Montagewagen beschäftigten Leute dürfen denselben nur mit Erlaubnis des Montagewagenführers verlassen.

---

[1]) Aus dem »Taschenbuch für Monteure elektrischer Straßenbahnen« von Fritz Loose und M. Schiemann. Oskar Leiner, Leipzig.

10. Unbefugte Personen sind von dem Montagewagen fern zu halten, vor allem aber darf kein Stehenbleiben von Personen unter Drähten, an welchen gearbeitet wird geduldet werden.

Fig. 49. Montagewagen englischer Bauart im Betrieb.

11. Die Montagewagen sind standsicher aufzustellen und müssen stets festgebremst sein.

12. Die Weiterbewegung der Montagewagen darf nur nach erfolgten Warnungsrufen an die auf demselben Beschäftigten stattfinden.

Digitized by Google

13. Der Montagewagen darf niemals auf der Innenseite einer Kurve aufgestellt werden.

14. Das Hinunterwerfen von Montagegegenständen ist möglichst zu vermeiden.

Fig. 50. Montagewagen von Siemens & Halske mit drehbarer Plattform.

Ist es dennoch notwendig, Gegenstände hinunterzuwerfen, so hat der Betreffende zu achten, daß keine Person getroffen, und die Umstehenden durch einen Warnungsruf aufmerksam gemacht werden.

15. Der Genuß von Spirituosen während der Arbeitszeit ist strengstens untersagt.

Digitized by Google

16. Werkzeuge und Gerätschaften dürfen nur dann in Gebrauch genommen werden, wenn sich der dieselben in Gebrauch nehmende davon überzeugt hat, daß sie in gutem Gebrauchszustande sind.

Fig. 51. Kabelkran.

17. Montagewagen oder andere Montagegeräte, welche so stark beschädigt sind, daß ihre Benutzung mit Gefahr verknüpft ist, sind sofort außer Betrieb zu setzen; hauptsächlich ist darauf zu achten, daß an den Leitern keine Sprossen fehlen. Ebenso sind die Holme

und Sprossen vor dem Gebrauch auf ihre Sicherheit zu prüfen.

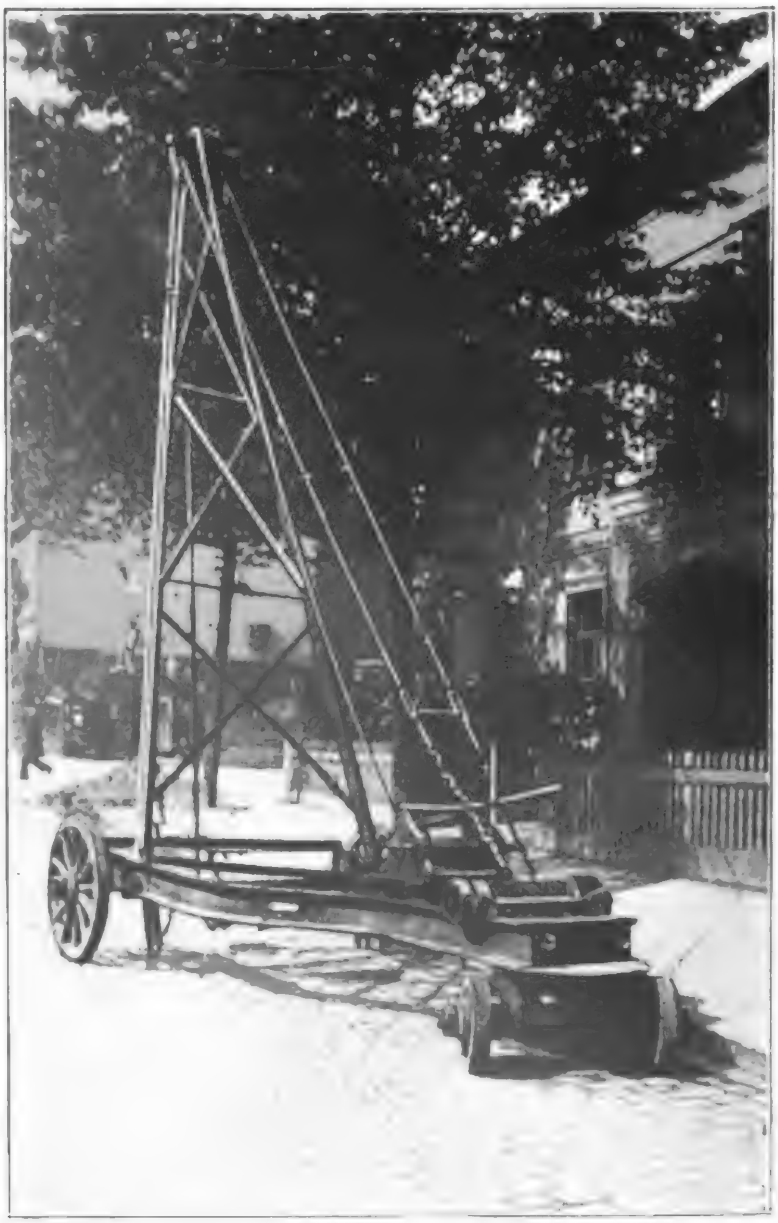


Fig. 51a. Mastenkran.

18. Auf einer Leiter darf nur dann gearbeitet werden, wenn ein Mann am Fuße derselben aufgestellt ist, damit dieselbe nicht abrutschen kann.

Digitized by Google

19. Der auf der Leiter arbeitende Monteur hat stets einen Sicherheitsgurt zu tragen und den Sicherheitshaken an einem haltbaren Gegenstand festzuhaken, um etwaige Unfälle zu verhüten.

20. Beim Arbeiten auf dem Montagewagen sind die an demselben vorhandenen Schutzvorrichtungen zu gebrauchen.

Eine Arbeit außerhalb der Schutzvorrichtungen ist verboten; vor allem jedes Stehen auf dem Geländer der Plattform.

21. Die Plattform des Montagewagens darf nur dann herabgelassen oder höher gezogen werden, wenn alle auf derselben beschäftigten Leute dieselbe verlassen haben.

Fig. 52. Große mechanische Leiter.

22. Erweisen sich die vorhandenen Leitern als zu kurz oder die Plattform als zu niedrig zur Arbeit, so ist dem Obermonteur davon Nachricht zu geben, und durch diesen dem Übelstand Abhilfe zu schaffen.

23. Arbeiten an stromführenden Leitungen sind mit großer Vorsicht vorzunehmen. Ein jeder ist so-

Digitized by Google

fort in Kenntnis zu setzen, daß die Leitung unter Strom ist.

Fig. 53. Unterer Teil der großen mechanischen Leiter.

24. Beim Arbeiten unter Strom ist es sorgfältigst zu vermeiden, die stromführende Arbeit und einen mit der Erde in Verbindung stehenden gut leitenden unisolierten Gegenstand gleichzeitig zu berühren.

Digitized by Google

25. Unbefugte sind von stromführenden Leitungen ernstlich fern zu halten und vor allem müssen herunterhängende stromführende Drähte sofort entfernt werden.

26. Überall, wo an stromführenden Leitungen gearbeitet wird, ist die Arbeitsstelle durch zu beiden Seiten derselben ausgesteckte rote Fahnen kenntlich zu machen.

27. Nach vorhergegangener Vereinbarung mit der betreffenden Straßenbahngesellschaft haben alle

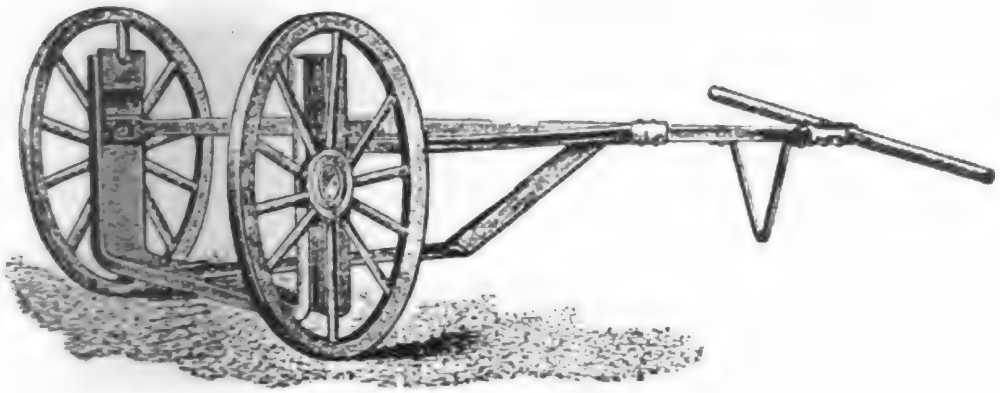


Fig. 54. Drahtkarren.

Straßenbahnwagen langsam zu fahren an der Stelle, an der gearbeitet wird, und hauptsächlich, wenn der Montagewagen dicht an dem Geleise Aufstellung genommen hat.

Falls der Straßenbahnwagenführer dieser Vorschrift nicht Folge leistet, so hat der Montagewagenführer die Nummer des Wagens zu notieren nebst genauer Zeitangabe des Vorfalles und bei nächster Gelegenheit einem der Ingenieure Anzeige davon zu machen.

28. Nach eintretender Dunkelheit muß der Montagewagen genügend beleuchtet sein.

29. Das Liegenlassen von Montagegegenständen oder Materialien auf der Straße nach Schluß der Arbeits-

Digitized by Google

zeit zieht eine Bestrafung der betreffenden Arbeitskolonne nach sich.

30. Von jedem ernsteren Unfall ist unverzüglich einem der Ingenieure Meldung zu machen.

31. Falls sich ein Unfall ohne Benützung der Schutzvorrichtungen ereignet, hat der Betreffende die volle Verantwortung selbst zu tragen.

32. Sämtliche Monteure und Arbeiter haben den Anordnungen der Ingenieure unweigerlich Folge zu leisten.

33. Zuwiderhandlungen gegen diese Vorschriften ziehen für den Betreffenden außer etwaiger strafrechtlicher Verfolgung sofortige Entlassung nach sich.

Vorschriften bezüglich des Schutzes der Telegraphen- und Fernsprechanlagen.

Oberirdische Anlagen.

1. Für die mit Gleichstrom oder Wechselstrom (ein- oder mehrphasigem) zu betreibenden Anlagen müssen die Hin- und Rückleitungen des Stromkreises durch besondere Leitungen gebildet werden. Die Erde darf als Rückleitung nicht benutzt oder mitbenutzt werden.

2. Die Hin- und Rückleitungen müssen in einem so geringen, überall gleichen Abstande voneinander verlaufen, als dies die Rücksicht auf die Sicherheit des Betriebes zuläßt.

3. An den Kreuzungsstellen der Starkstromleitungen mit den Reichs-Telegraphen- und Fernsprechleitungen müssen die Starkstromleitungen mindestens in dem in Betracht kommenden Stützpunkts-Zwischenraum entweder aus isoliertem Draht herge-

stellt werden, oder es sind bei Verwendung blanken Drahtes solche stromfreie Schutzvorrichtungen anzubringen, daß eine unmittelbare Berührung der Leitungen verhindert wird. Die Starkstromleitungen sind so zu führen, daß sie die Schwachstromleitungen möglichst rechtwinkelig kreuzen. Der Abstand der Starkstromleitungen von den Schwachstromleitungen darf nicht weniger als 1 *m* betragen.

4. An denjenigen Stellen, wo die Starkstromleitungen neben den Schwachstromleitungen verlaufen und der gegenseitige Abstand weniger als 10 *m* beträgt, müssen die Starkstromleitungen auf eine ausreichende Strecke hin aus isoliertem Draht hergestellt oder bei Verwendung blanken Drahtes mit stromfreien Schutzvorrichtungen zur Verhinderung der Berührung mit den Schwachstromleitungen (vergl. Punkt 3) versehen werden. Von dieser Bedingung kann abgesehen werden, wenn die örtlichen Verhältnisse eine Berührung der Starkstrom- und Schwachstromleitungen, auch beim Umbruch von Gestängen oder beim Zerreißen von Drähten, ausschließen.

5. Die isolierende Hülle des nach Punkt 3 und 4 zu benutzenden isolierten Drahtes darf bei unmittelbarer Berührung mit einem blanken, zur Erde abgeleiteten Draht unter Einwirkung der höchsten vorkommenden Betriebsspannung nicht durchschlagen werden. Widersteht die isolierende Hülle der höchsten Betriebsspannung nicht, so wird der Draht als nicht isoliert angesehen. Die Prüfungen des isolierten Drahtes müssen unter Zuziehung eines Beauftragten der Ober-Postdirektion ausgeführt werden.

Im Falle des Bedürfnisses werden zum weiteren Schutze der vorhandenen Telegraphenleitungen in denselben Schmelzsicherungen eingeschaltet.

6. Falls die vorgesehenen Schutzmaßregeln nicht ausreichen, um Unzuträglichkeiten oder Störungen für

den Telegraphen- oder Fernsprechbetrieb fernzuhalten, hat der Unternehmer der Starkstromanlage, im Einvernehmen mit der kaiserlichen Ober-Postdirektion, ohne Verzug weitere Maßnahmen zu treffen, bis die Beseitigung der Unzuträglichkeiten oder der störenden Einflüsse erfolgt ist.

7. Alle Kosten, welche durch die Ausführung der erforderlichen Maßnahmen zum Schutze der vorhandenen Reichs-Telegraphen- und Fernsprechleitungen oder gegen Gefahren der mit denselben beschäftigten oder dieselben benutzenden Personen oder zur Fernhaltung induktorischer Beeinflussung durch die Starkströme oder durch Änderungen oder sonstige Arbeiten an den bei Errichtung der Starkstromanlage bestehenden Reichs-Telegraphen- und Fernsprechleitungen aus Anlaß der Herstellung, der Unterhaltung oder des Betriebes der Starkstromanlage entstehen, sind vom Unternehmer der Postkasse zu erstatten.

Die hierüber entstehenden Streitigkeiten werden im Rechtswege entschieden.

8. Für den Fall, daß Fehler in der Starkstromanlage zu Störungen des Telegraphen- oder Fernsprechbetriebes Anlaß geben, muß der Betrieb der Starkstromanlage in entsprechendem Umfange so lange eingestellt werden, bis der Fehler beseitigt ist.

9. Spätere wesentliche Veränderungen oder Erweiterungen der Starkstromanlage sollen im Einvernehmen mit der kaiserlichen Ober-Postdirektion ausgeführt werden. Die Unternehmer verpflichten sich, der genannten Behörde von derartigen Plänen rechtzeitig vorher Kenntnis zu geben.

Werkzeuge für die Herstellung der Oberleitung.[1])

2 große Handhämmer,
1 kleiner Handhammer,
1 Feilkloben,
2 Flaschenzüge,
1 Beißzange,
1 Seitenschneider,
2 Brennerzangen,
1 Kreuzmeißel,
1 Flachmeißel,
1 Lötlampe,
1 Benzinkanne,
1 Lötofen,
2 Drahtlötkolben,
1 Klappenzange,
1 Stützenzange
1 Bandmaß 20 *m*,
1 Lot,
1 Schraubstock,
1 Holzhammer,
1 Richtholz,
1 Knarre mit Bügel,
1 Satz Metallbohrer,
Fahrbare Leitern,
Lötzinn,
Lötwasser und Pinsel,
Stricke, Schnüre,
Bindedraht,
1 Stechbeutel,
2 Dreheisen für 5 *mm*,
2 Dreheisen für 6 »
1 Bogensäge mit 12 Sägeblättern,
2 Steinbohrer,
Feilen,
2 △,
2 ▭ Vor-,
1 ◠ »
2 ○,
1 △ Zinn-,
1 ▭ »
1 Fuchsschwanz,
2 Stecheisen,
Spannschrauben,
Klammern,
2 lange Leitern,
1 kurze Leiter,
Pinsel,
Laternen,
Gasätherlampen (Sturmbrenner),
Salmiak,
Ölspritzkanne,
Putzlappen.

[1]) Die Werkzeuge sind in besonderen Werkzeugkasten oder im verschlossenen Raum der Turmwagen untergebracht. Die Werkzeugausrüstung gilt für Rollenkontakt nach Sprague oder Dickinson, für den Bügelkontakt von Siemens & Halske sind noch einige Schraubenzieher erforderlich.

Lieferungsbedingungen für Fahr- und Hängedraht zur Oberleitung von Straßenbahnen.[2])

Fahrdraht:

1. Die Oberfläche der Drähte soll glatt und ohne Risse sein. Der Draht muß gerade, ohne Knicke und Buckel sein.

2. Auf besonderen Holzhaspeln soll der Draht so aufgewickelt sein, daß die Windungen schichtweise verlaufen und eine Windung neben der andern in einer Schicht sich befindet.

3. Die Leitungsfähigkeit soll 98% derjenigen des chemisch reinen Kupfers sein.

4. Die Bruchfestigkeit soll bei 8—8·3 *mm* Durchmesser des Drahtes 39—40 *kg* pro Quadratmillimeter betragen.

5. Die Ausdehnung des Drahtes bis zum Bruch soll zwischen + 10 und + 15° C. höchstens 1·5% seiner Länge betragen.

6. Ausdehnung bei Temperaturzunahme soll pro 1° C. zwischen 0—50° C. nicht über 0·11681 *mm* pro 1 *m* Länge betragen.

7. Die Elastizitätsgrenze soll liegen zwischen 36 bis 37 *kg* Zug pro Quadratmillimeter. Der Draht soll mindestens zwei Biegungen über 10 *mm* Radius aushalten.

8. Es sind mindestens Stücke von 500 *m* Länge zu liefern, sofern keine Länge vorgeschrieben ist.

Etwaige Lötstellen sind mit reinem Silber vor dem Ziehen auf die richtige Stärke anzufertigen. Die Lötstellen sollen die gleiche Zug- und Bruchfestigkeit wie der volle Kupferdraht haben.

[2]) N. Elektr. Verkehrstechnik von Joh. Zacharias, Jena 1902.

Hängedraht.

1. Der Spanndraht für die Aufhängung des Fahrdrahtes soll aus bestem Gußstahl gefertigt sein und eine mindeste Bruchfestigkeit von 100 *kg* pro Quadratmeter haben.

2. Die Zähigkeit soll derartig sein, daß ein Draht von 5 *mm* Durchmesser sieben Biegungen, von 6 *mm* Durchmesser vier Biegungen über 15 *mm* Radius aushält.

3. Die Dehnung soll mindestens 5 % sein, bevor ein Bruch erfolgt.

4. Die Oberfläche soll glatt und einmal gut verzinkt sein.

Abspannungen.

Für die Herstellung der Oberleitung gelten folgende Regeln:

1. Leitungsdraht und Zugdraht sollen keinen zu spitzen Winkel miteinander bilden.

2. In Kurven sollen die Spann- beziehungsweise Zugdrähte, die einen Aufhängepunkt für sich erfordern, von der Richtung der Radien der Kurven nicht abweichen, weil anderenfalls ein Zug auf den Leitungsdraht ausgeübt würde dessen eine Komponente in die Richtung desselben fallen und somit dessen Spannung verändern würde.

3. Der Spanndraht einer Luftweiche soll so angelegt werden, daß er an dem Punkt angreift, wo der Abstand der beiden abzweigenden Schienen 30 *cm* beträgt, und zwar etwa 4·5 *m* vom Ende der Gleitschienen oder 1·5 *m* vom Ende der Zunge.

4. In Abständen von etwa 500 *m* ist eine Streckenverankerung, sowie ein Sektionsschalter anzubringen.

5. Die Masten für die Tragkonstruktion des Fahrdrahtes erhalten entgegen der Zugkraft der Spann-

drähte eine Neigung von etwa 25 *mm* pro Meter Steigung ihrer freien Länge.

6. Die Spannung des Kontaktdrahtes soll die nachstehenden Größen nicht überschreiten.

Fahrdrahtspannung bei verschiedener Temperatur.

bei	0^0	Celsius	— 470 *kg*
+	5^0	»	— 435 »
+	10^0	»	— 395 »
+	15^0	»	— 360 »
+	20^0	»	— 320 »
+	25^0	»	— 280 »

Diese Spannungen sind beim Ziehen neuer Leitungen einzuhalten und an einem Dynamomotor abzulesen.

Abspanntabelle des Fahrdrahtes in Kurven für Rollenkontakt.

R	*x*	*R*	*x*	*R*	*x*	*R*	*x*
5	4·9	23	10·5	42	14·2	110	23·0
6	5·4	24	10·7	44	14·5	120	24·0
7	5·8	25	11·0	46	14·8	130	25·0
8	6·2	26	11·2	48	15·2	140	26·0
9	6·6	27	11·4	50	15·6	150	27·0
10	6·9	28	11·6	52	15·8	160	27·7
11	7·3	29	11·8	54	16·1	170	28·6
12	7·6	30	12·0	56	16·4	180	29·4
13	7·9	31	12·2	58	16·7	190	30·2
14	8·2	32	12·4	60	17·0	200	31·0
15	8·5	33	12·6	65	17·7	220	32·5
16	8·8	34	12·8	70	18·3	240	33·9
17	8·9	35	13·0	75	19·0	260	35·3
18	9·3	36	13·1	80	19·6	280	36·7
19	9·5	37	13·3	85	20·2	300	37·9
20	9.8	38	13·5	90	20·8	320	39·2
21	10·0	39	13·7	95	21·3	333	40·0
22	10·3	40	13·8	100	22·0		

Die Seitenlänge des Vieleckes, beziehungsweise die Spannweite wird berechnet aus $\omega = 4\sqrt{rs}$, wobei r der Radius der Kurve, bezogen auf die Mitte des Geleises, und s die Abweichung des Bügels aus der Mitte $= 0{\cdot}45\ m$ bedeutet. Die Anzahl der Teilungen ist $n \geqq \frac{4}{229}\sqrt{\frac{r}{s}}$. Die vorstehende Tabelle gilt für Zentriwinkel von 30—165° und 10—120 m Radius[1]).

Die Teilung auf gerader Strecke für die Anbringung der Querdrähte beträgt 38 m. Obige Tabelle gilt für eine Kontaktrute von mindestens 4·5 m Länge und 6 m Höhe des Fahrdrahtes über dem Geleise.

Berechnung der mechanischen Spannung an Drähten.[2])

Spannung T wird T^1 bei veränderter Temperatur.[3])

$$\varepsilon = \frac{T - T^1}{s}$$

$$s = qmm$$

$$\frac{\varepsilon}{s} = \varepsilon^1$$

$$l^1 = l\,(1 + \delta +)\,[1 - \varepsilon^1\,(T - T^1)] = a + \frac{a^3\,p^2}{24\,T^2}$$

$$l = a + \frac{a^3\,p^2}{24\,T^2}$$

$$1\,\delta\,t - 1\,\varepsilon^1\,(T - T^1) = \frac{a^3\,p^2}{24}\left(\frac{1}{T_1^{\,2}} - \frac{1}{T^2}\right)$$

$$\delta\,t - \varepsilon^1\,(T - T^1) = \frac{a^2\,p^2}{24}\left(\frac{1}{T_1^{\,2}} - \frac{1}{T^2}\right)$$

[1]) Aus dem Taschenbuch für Monteure von Fr. Loose und M. Schiemann.

[2]) Eric Gerard Tome II 1891, Leçons sur l'Electricité, S. 84.

[3]) Über den Durchhang blanker Freileitungen aus Weichkupfer gibt K. Krome in E. T. Z. 1902, Heft 27, vom 3. Juli, S. 593, theoretische und praktische Anleitungen.

$\delta = 0{\cdot}000016$ für Phosphor, Bronze
für Eisen $= 8000{\cdot}012$
$\varepsilon = 0{\cdot}00000078$
für Eisen $= 0{\cdot}00000034$
$\delta =$ Koeffizient für die Ausdehnung pro 1^0 C.
$\varepsilon =$ elastische Verlängerung für Überlastung von 1 *kg* auf den Quadratzentimeter, z. B.

$$t = -20^0$$
$$+40$$
$$\delta = 0{\cdot}00001718$$
$$\varepsilon^1 = \frac{1}{13000}{\cdot}95$$
$$T = 600\ kg$$
$$T^1 \text{ zu suchen}$$
$$a = 32\ m$$
$$p = 0{\cdot}85\ kg.$$

Kurvenabspannung für Bügelkontakt und Rolle [1]).

Zentr.-∢ φ in Grad	$r = 10$		$r = 20$		$r = 30$		$r = 40$		$r = 50$		$r = 60$	
	n	w	n	w	n	w	n	w	n	w	n	w
30	1	5·2	1	10·5	2	7·9	2	10·5	2	13·0	2	15·7
45	1	7·8	2	7·9	2	11·8	2	15·7	3	13·1	3	15·7
60	2	5·2	2	10·5	3	10·5	3	14·0	3	17·4	4	15·7
75	2	6·5	2	13·1	3	13·1	4	13·1	4	16·3	4	19·7
90	2	7·8	3	10·5	4	11·8	4	15·7	5	15·7	5	18·8
105	3	6·1	4	9·2	4	13·8	5	14·8	5	18·4	6	18·3
120	3	7·0	4	10·5	5	12·5	5	16·8	6	17·5	7	17·9
135	3	7·8	4	11·8	5	14·1	6	15·7	7	16·9	7	20·2
150	4	6·6	5	10·5	6	13·1	7	15·0	7	18·7	8	19·6
165	4	7·2	6	9·6	6	14·4	7	16·5	8	20·6	9	19·2

[1]) Für den Rollenkontakt müssen die für den Bügel berechneten Polygonseitenzahlen mit 1·3 multipliziert werden.

Zentr.-∢ φ in Grad	$r = 70$		$r = 80$		$r = 90$		$r = 100$		$r = 110$		$r = 120$	
	n	w	n	w	n	w	n	w	n	w	n	w
30	2	18·3	2	20·9	2	23·5	2	26·1	3	19·1	3	20·9
45	3	18·3	3	20·9	3	23·5	3	26·1	4	21·5	4	23·5
60	4	18·3	4	20·9	4	23·5	4	26·1	5	23·0	5	25·1
75	5	18·3	5	20·9	5	23·5	5	26·1	6	23·9	6	26·1
90	5	22·0	6	20·9	6	23·5	6	26·1	7	24·6	7	26·9
105	6	21·3	7	20·9	7	23·5	7	26·1	8	25·2	8	27·5
120	7	20·9	7	23·9	8	23·5	8	26·1	9	25·5	9	27·9
135	8	20·6	8	23·6	9	23·5	9	26·1	10	25·8	10	28·2
150	9	20·4	9	23·3	10	23·5	10	26·1	11	26·1	11	28·5
165	9	22·4	10	23·0	11	23·5	11	26·1	12	26·3	12	28·8

Neue Kurvenabspannung nach System Dickinson.[1])

Radius der Kurve	Länge der Teilung	Auslage der Kontakt-rute	Kurven-zug für einfachen Fahrdraht	Winkel des Kontakt-drahtes
m	*m*	*m*	*kg*	Grad
300	—	0·75	100	173
200	—	1·05	100	170
150	—	1·20	130	166
125	38	1·50	150	163
100	36	—	175	160
90	34·5	—	185	159
80	31·5	—	200	158
70	30	—	210	156
60	28	—	210	156
50	22·5	1·35	230	154
40	20·75	1·35	—	—
30	15·5	1·02	—	—
25	13	0·85	—	—
20	10·35	0·68	—	—
15	7·75	0·52	—	—
10	5·2	0·34	250	150

[1]) N. Elektr. Verkehrstechnik von Joh. Zacharias.

Isolationswiderstand von Installationen.[1])

Bei einer Anlage von

0— 20	Lampen	=	60.000 Ohm
20— 50	»	=	30.000 »
50—100	»	=	20.000 »
100—200	»	=	15.000 »
200—300	»	=	13.000 »
300—500	»	=	12.000 »

$$1^{W} = 10.000 + \frac{1{,}000.000}{n} \text{ Ohm}$$

n = Lampenzahl.

Nach amerikanischen Vorschriften.

Bis zu	5	Ampère		=	4,000.000	Ohm
» »	10	»		=	2,000.000	»
» »	25	»		=	800.000	»
» »	50	»		=	400.000	»
» »	100	»		=	200.000	»
» »	200	»		=	100.000	»
» »	400	»		=	50.000	»
» »	800	»		=	25.000	»
» »	1600	»	und darüber	=	12.000	»

mindestens.

Sonst rechnet man auch für eine Anlage von 2000 Lampen 250.000 Ohm.

Eine Leitung für 2000 Lampen 100.000 Ohm.

$$R = \frac{(V - V_1) R_1}{V_1} \text{ worin}$$

R = Isolationswiderstand.
R_1 = Voltmeterwiderstand.
V = Volt Betriebsspannung.
V_1 = Ausschlag-Volt bei Untersuchung.

[1]) Nach den Vorschriften der Berliner Elektrizitätswerke von 1896.

Der Isolationswiderstand beträgt für 20.000 Ohm Voltmeterwiderstand und 110 Volt Betriebsspannung, bei einem Ausschlag von

1 Volt	2,180.000	Ohm[2])
2 »	1,080.000	»
3 »	713 333	»
4 »	530.000	»

Die Stromzuführung.

Die Länge der zu befahrenden Linien, ihre Lage zueinander und zum Kraftwerk, wie auch die Verkehrsverhältnisse sind maßgebend sowohl für die allgemeine Anordnung des Leitungsnetzes, wie auch für den Querschnitt der Speiseleitungen und die Anlage von Speisepunkten. Insbesondere sind erforderlich:

Aufsuchen der Punkte höchster zu erwartender Belastung;

Annahme der größten Belastung;

Wahl der Kontaktleitungen;

Disposition und Berechnung der Speiseleitungen;

Leitungsverstärkungen für zu erwartende hohe Belastungen.

Die Berechnung der Leitungen

geschieht nach dem Ohmschen Gesetz, wonach $I = \frac{E}{W}$ ist oder wenn man $E = v$ dem Spannungsverlust setzt, hat man $I = \frac{v}{W}$. Die Stromstärke I und der Spannungsverlust v sind bekannt, beziehungsweise angenommen, es ist also der Widerstand W zu suchen.

[2]) American Electrician, S. 400, Vol. IX, No. 10 vom Oktober 1897. Nach den »Sicherheitsregeln für elektrische Bahnen« vom Verein deutscher Elektrotechniker soll bei Regenwetter mit der Betriebsspannung gemessen der Isolationswiderstand mindestens 50.000 Ohm für den Kilometer einfacher Länge betragen.

Derselbe berechnet sich aus der Länge L in Metern und dem Querschnitt Q in Quadratmillimetern einer Leitung, sowie dem spezifischen Widerstand c des Leitungsmaterials. Es ist also

$$W = c \frac{L}{Q}$$

worin $c = 0{\cdot}0182$ (bis $0{\cdot}0186$) für Kupfer zu setzen ist. Aus den vorstehenden Gleichungen ergibt sich

$$Q = c \frac{L I}{v}$$

Zur Vereinfachung der oft sich wiederholenden Rechnung bedient man sich einer Tafel, in welcher $L \times I$ in Meterampère am oberen Rande angegeben sind, während Strahlen dem Spannungsverluste v entsprechen und seitwärts die Querschnitte, beziehungsweise Durchmesser der Kupferleitungen, angegeben sind.

Will man auch das Gewicht einer Leitung wissen, so berechnet sich dasselbe aus der Formel

$$G = \frac{L + Q}{112}$$

oder wenn man obigen Wert für Q einsetzt, so ist

$$G = \frac{c \times L^2 \times I}{112 \cdot v}$$

und da $c = 0{\cdot}0182$ ist, so hat man

$$G = \frac{L^2 \times I}{6150 \cdot v}$$

oder für einen Meter Leitungslänge

$$\frac{G}{L} = \frac{L \times I}{6150 \cdot v}.$$

Digitized by Google

3. Das rollende Material.

Motorwagen.

Im allgemeinen hat man wohl die äußere Gestalt der bisherigen Pferdebahnwagen für die elektrischen Motorwagen beibehalten, im einzelnen jedoch sind sie vollkommen abweichend konstruiert, entsprechend der größeren Fahrgeschwindigkeit, der höheren Belastung und der Möglichkeit ein bis drei Anhängewagen mit-

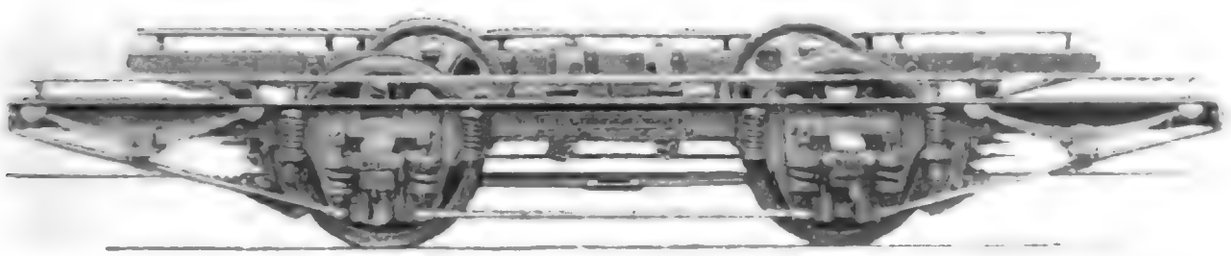


Fig. 55. Normal-Untergestell, zweiachsig.

zuführen. In einem meist aus Stahl und Schmiedeeisen hergestellten Untergestell, das bei zweiachsigen Wagen im allgemeinen die Anordnung wie in Fig. 55 hat, sind die auf den Wagenachsen festgekeilten Räder meistens aus Stahlguß (Fig. 56) federnd gelagert. Der Querschnitt des Radkranzes hat den in Fig. 57 abgebildeten Querschnitt, damit die Wagen in der Fahrrinne der Schienengeleise festgehalten werden.

Größere Wagen bis zu etwa 60 Personen, wovon 30 etwa sitzen können, erhalten vier Achsen, von denen je zwei in einem drehbaren Untergestell (Fig. 58)

angebracht sind. Einen vierachsigen Motorwagen der Berlin-Charlottenburger Straßenbahn zeigt Fig. 59. Die Wagen waren ursprünglich lediglich für Akkumulatorenbetrieb eingerichtet, sind jedoch später für gemischten Betrieb umgebaut worden, indem man auf dem Dach

Fig. 56. Wagenachse und Räder

des Wagens einen entsprechenden Stromabnehmer befestigt hat. Die Anordnung der einzelnen Teile des Wagengerippes und der Tragkonstruktion sind aus dem Querschnitt (Fig. 60) eines zweiachsigen Motorwagens ersichtlich.

Fig. 57. Randflanschquerschnitt.

Als historisch interessant mag hier noch die erste von Siemens & Halske gebaute elektrische Versuchsbahn auf der Hygiene-Ausstellung 1879 (Fig. 61) abgebildet werden. Das Innere der Lokomotive dieser kleinen Versuchsbahn zeigt Fig. 62. Dieselbe wird heute noch von der Firma sorgfältig aufbewahrt, war unter anderem auch zum Beispiel 1893 in Chicago

Digitized by Google

ausgestellt worden und ist jetzt im Geschäftshause der Firma zu sehen.

Neuerdings hat man ganz eigenartige und besondere Typen von Motorwagen für Straßenbahnen geschaffen, wie sie zum Beispiel in vorzüglicher Ausführung nach amerikanischer Art die Firma H. H. Böker & Co. in Groß-Lichterfelde bei Berlin herstellt. Diese Wagen sind so eingerichtet, daß man sie für den Winter als geschlossene und für den Sommer als

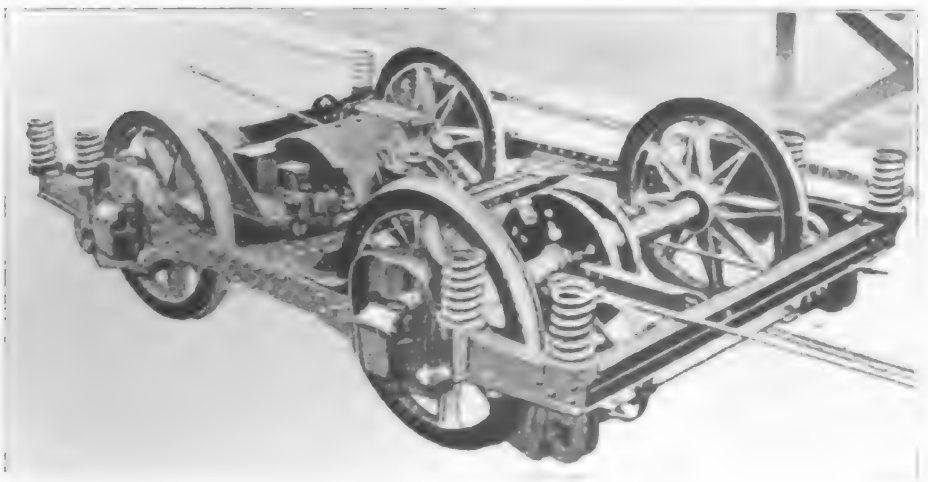


Fig. 58. Drehbares Untergestell.

offene Wagen benutzen kann. Sie sind mit allen Hilfs- und Sicherheitsvorrichtungen der Neuzeit ausgestattet und ist eine größere Anzahl davon bereits bei der Großen Berliner Straßenbahn im Betrieb.

Für die Reinigung der Geleise sind vielfach Kehrmaschinen, im Sommer Sprengwagen und im Winter Schneepflüge im Gebrauch, von denen Fig. 63 einen solchen im Betrieb nach der Konstruktion von Kummer & Co. darstellt. Da der Schnee die Räder von den Schienen mehr oder weniger isoliert, so ist es unter Umständen bei hoch liegendem, fest backendem Schnee nicht möglich, sofort mit Oberleitung, also

Digitized by Google

direkter Stromzuführung zu fahren und hat man daher mitunter den Schneepflug auch mit einer Akkumulatorenbatterie ausgerüstet, damit man unabhängig von der Oberleitung unter allen Umständen die erste Fahrt des Morgens nach starken Schneefällen machen kann und der Weg für die nachfolgenden Motorwagen gebahnt wird.

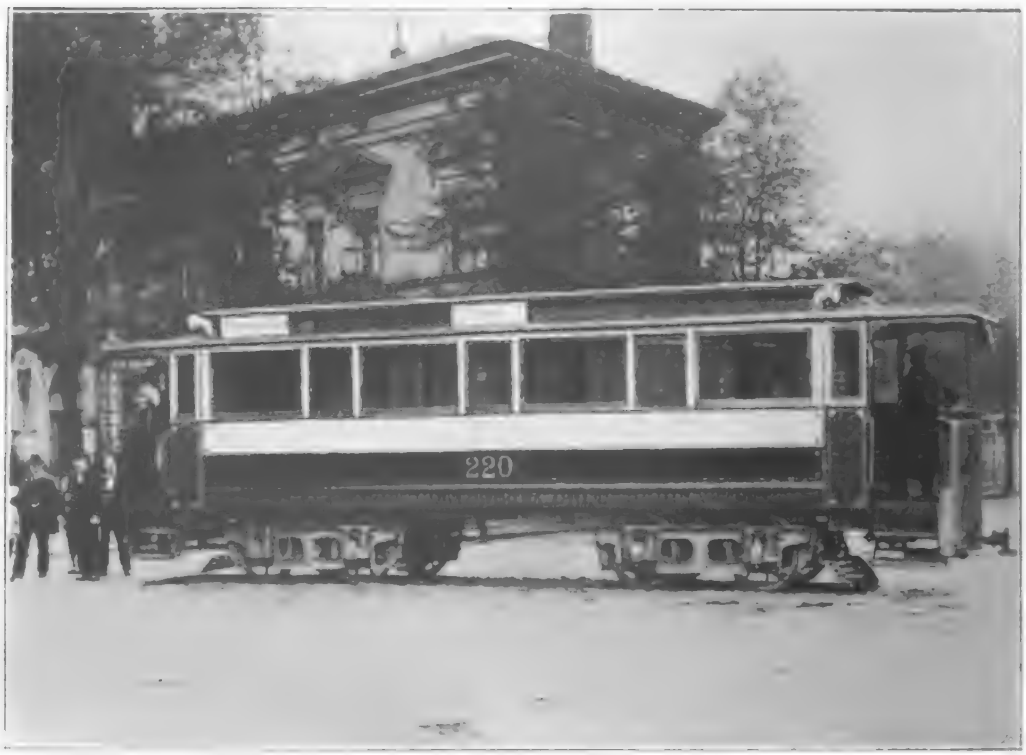


Fig. 59. Vierachsiger Motorwagen.

Für Hoch- und Untergrundbahnen gibt man den Wagen vielfach die Gestalt eleganter Eisenbahnwagen. Sie sind meistens mit vier Achsen versehen und zu drei bis vier in einem Zuge vereinigt. Sie haben entweder einen Eingang an jedem Ende oder in der Mitte. Die Sitze sind gewöhnlich zu beiden Seiten angeordnet, so daß in der Mitte ein Gang bleibt. Vielfach wendet man auch Quersitze für je zwei Personen an, wie zum Beispiel auf den Londoner Röhrenbahnen.

Digitized by Google

Ungefährer Raumbedarf für Wagenschuppen in Quadratmetern.[1])

Anzahl der Wagen	Wagenhalle	Schlosserei	Schmiede	Lackiererei	Lager	Zur Abrundung	Bebaute Fläche	$\frac{1}{2}$ bebaute Fläche	Gesamtraum
5	130	30	15	30	8	7	220	110	330
10	260	40	20	35	12	13	380	190	570
15	390	50	25	40	16	19	540	270	810
20	520	60	30	45	20	25	700	350	1050
30	780	70	35	55	25	35	1000	500	1500
40	1040	80	40	65	30	35	1290	650	1940
50	1300	100	50	80	35	35	1600	800	2400
75	1950	130	60	100	40	40	2320	1160	3480
100	2600	150	80	120	45	55	3050	1530	4580
125	3300	180	100	140	50	60	3830	1920	5750
150	3900	200	120	160	55	65	4500	2250	6750

Gewichte und Maße von Motor- und Anhängewagen ohne Ausrüstung und Besetzung.

Sitzplätze	Stehplätze	Gewicht des Kastens	Gewicht des Unterg.	Gesamtgew. d. Motorw.	Gesamtgew. d. Anhängewag.	Maße in Millimeter			
		Tonnen				Kastenlänge	Plattform	Puffer	Länge über Puffer
12	8	2·2	1·4	3·6	2·5	3200	800	350	5.500
16	10	2·8	1·5	4·3	2·8	4200	1100	350	7.100
20	16	3·4	1·6	5·0	3·2	5200	1200	350	8.300
30	20	4·0	1·8	5·8	4·0	7700	1300	350	11.000

[1]) Gilt nur für zweiachsigen Wagen.

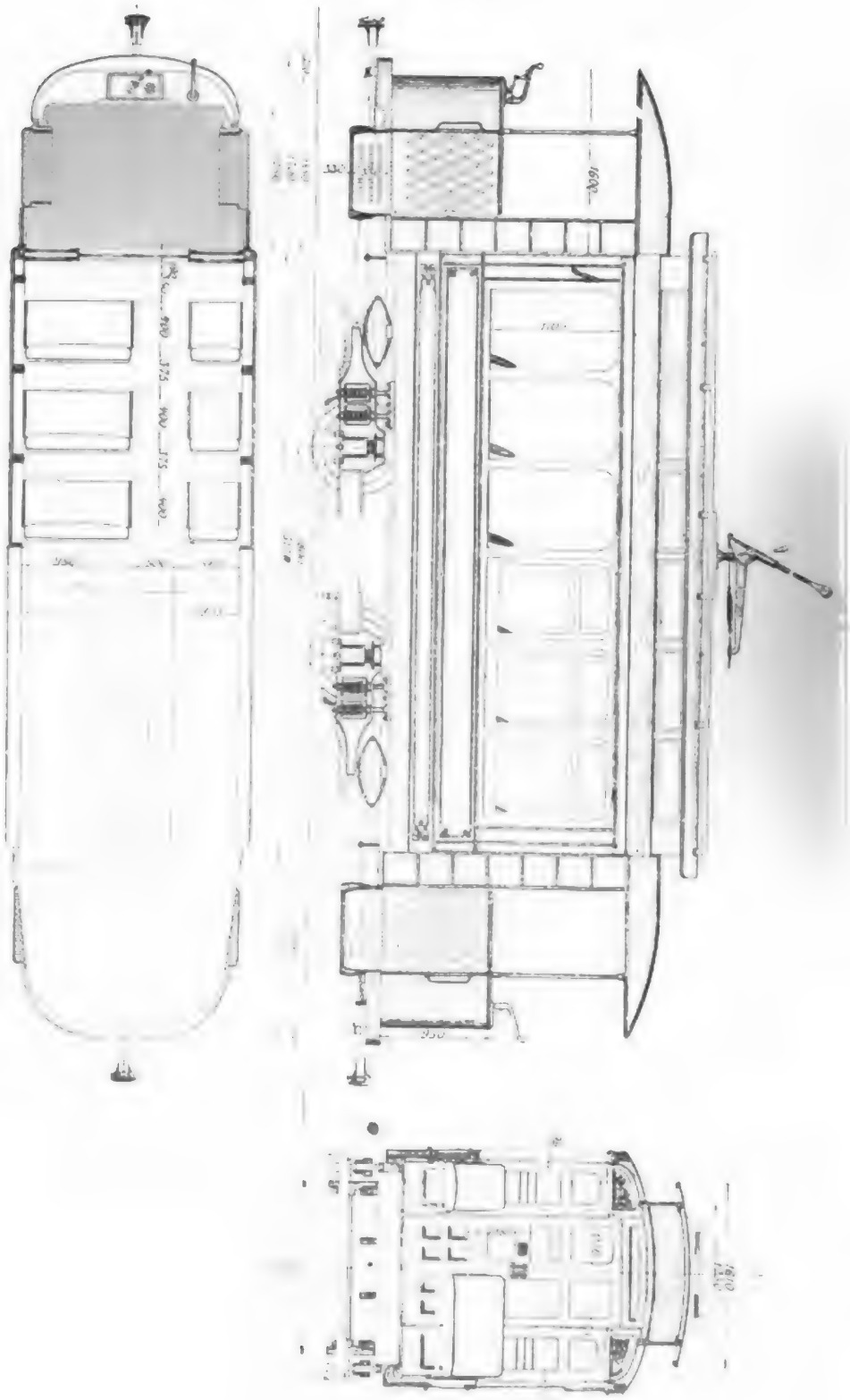


Fig. 60. Querschnitt eines zweiachsigen Wagens.

Digitized by Google

Wagen-Ausrüstung.

Zu der Ausrüstung der Motorwagen gehören die Elektromotoren, die Fahrschalter zur Steuerung derselben, die Verbindungsleitungen zu Motoren und Fahrschaltern, der Stromabnehmer, welcher entweder auf dem Dach oder seitwärts unter dem Wagen sich befindet, Blitzableiter, Selbstausschalter, Sicherheitsschalter und

Fig. 61. Erste elektrische Bahn.

die Beleuchtung des Wagens. Wir wollen nachstehend diese einzelnen Ausrüstungsstücke näher kennen lernen.

a) Die Motoren.

Die Einrichtung der Elektromotoren zum Betriebe von Fahrzeugen ist insofern vollkommen abweichend von feststehenden Motoren, als dieselben nicht allein gegen Witterungseinflüsse, Schmutz und Staub gesichert sein müssen, sondern vor allen Dingen auch einen sehr harten Dienst zu versehen haben, der viel höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit dieser

Durch Lösung einiger Schrauben läßt sich die untere Hälfte, des in der wagerechten Mittellinie geteilten Gehäuses schnell herunterklappen, ohne daß man den ganzen Motor aus dem Wagen entfernen muß. Die untere Hälfte bewegt sich in Scharnieren (dieselbe läßt sich durch Entfernung der Scharnierbolzen gleichfalls entfernen). Man kann also das Gehäuse sehr leicht

Fig. 63. Schneepflug.

öffnen und das Innere besichtigen. Der Anker kann hierbei gewöhnlich in seiner Lage im Oberteil, beziehungsweise im Unterteil verbleiben.

Der Anker besteht aus, durch Papierzwischenlagen isolierten, eisernen Blechen, die durch gußeiserne Endplatten zusammengehalten werden. Der so hergestellte schmiedeeiserne Kern enthält entsprechende Nuten, in welchen gewöhnlich die Trommelwicklung, als Scha-

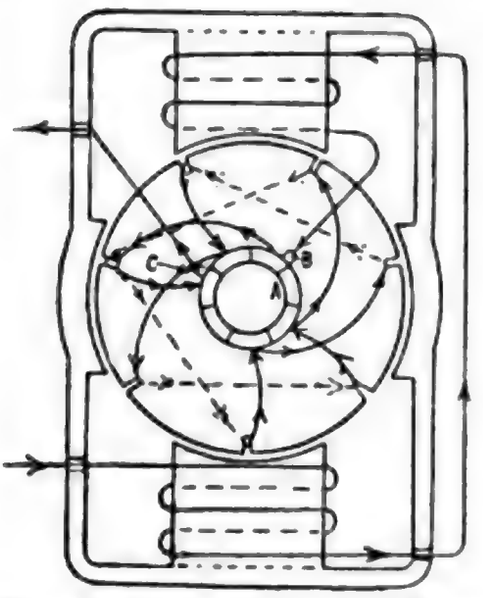


Fig. 64. Motorschaltung mit Folgepolen.

blonenwicklung ausgeführt, eingelegt wird, so daß schadhaft gewordene Stellen der Ankerwicklung leicht ausgewechselt werden können. Die Isolierung der Ankerwicklung ist äußerst sorgfältig ausgeführt und wird bereits in der Fabrik mit doppelter Betriebsspannung auf Isolation geprüft. Die Prüfung im Betriebe wird gewöhnlich mit normaler Belastung ausgeführt, und soll die angegebene Leistung bei geöffnetem Kommutatordeckel hierbei eine Erwärmung erzeugen, die 75° C. über die Temperatur der umgebenden Luft nicht übersteigt. Die Fahrzeugmotoren der Firma Siemens & Halske sind z. B. derart gebaut, daß sie vorübergehende Belastung ertragen, die 60—75% höher als die normale Leistung liegt und bei Überlastung bis zu 100%, welche für momentane Belastung maßgebend ist, die Feuergrenze noch nicht erreicht wird. Der maximale Wirkungsgrad dieser Elektromotoren beträgt je nach ihrer Größe bis zu 87%.

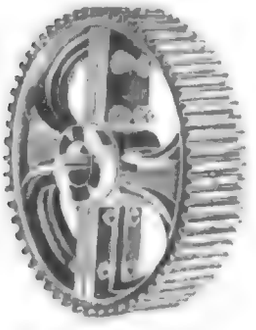


Fig. 65. Geteiltes Zahnrad.

Die Lager sind gewöhnlich so reichlich bemessen, daß sie für lange Betriebsdauer brauchbar bleiben. Sie werden so ausgebildet, daß das auslaufende Schmiermaterial sich in einem besonderen Raum unten ansammelt und von hier aus durch Öffnen einer Klappe entfernt werden kann. Nachstehend die Teile eines Straßenbahnmotors.

Die Übertragung der Kraft von den Motorwellen auf die Wagenachsen geschieht im allgemeinen durch

Digitized by Google

ein einfaches Rädervorgelege, indem man auf die Motorwelle einen Zahntrieb aufsetzt und auf die Wagenachse ein entsprechend geteiltes Zahnrad (Fig. 65). Die äußere Gestalt dieser Kapselmotoren mit der Welle und Zahnrad ist in zwei Ansichten nach amerikanischem Modell in Fig. 66 und 67 dargestellt. Unter Umständen verwendet man auch ein doppeltes Rädervorgelege oder einen Antrieb mit Schnecke und Schneckenrad

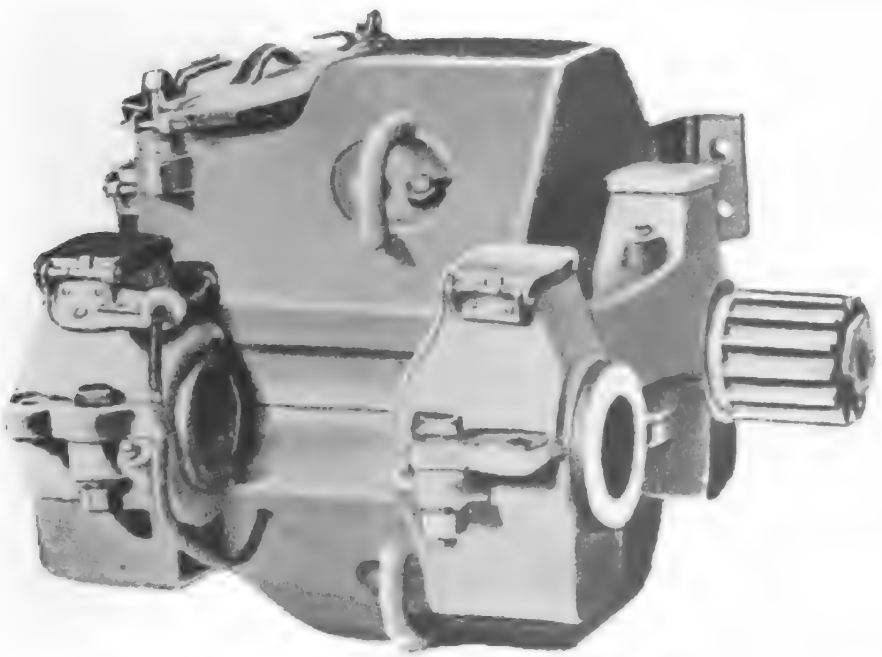


Fig. 66. Äußere Ansicht von Kapselmotoren.

(Schraube ohne Ende). Man hat jedoch auch z. B. auf der Untergrundbahn in Budapest Übertragung mit Gallscher Gelenkkette angewendet. Alle anderen Übertragungen, die man früher mit Riemen, Spiralschnüren, Darmsaiten u. dgl. versuchte, haben sich nicht bewährt. Bei sehr großen und starken Motoren, etwa von 200 P. S. ab, gestaltet man die Antriebswelle auch in der Weise, daß der Motor die Wagenachse umschließt und nicht neben derselben angeordnet ist. Für Straßenbahnen jedoch wird gewöhnlich die in vier Ansichten

dargestellte seitliche Aufhängung auf Federn (Fig. 68 bis 71) angewendet. Die Anordnung des Motors mit diesen Tatzenlagern und dem Rädervorgelege, das in einer Kapsel eingeschlossen ist, zeigt nach der Siemens & Halskeschen Konstruktion Fig. 72 a—c. Auf der Kollektorseite befinden sich an einer gemeinsamen isolierenden Brücke die Bürstenhalter mit den Kohlenbürsten. Das Gehäuse hat an dieser Stelle oben eine

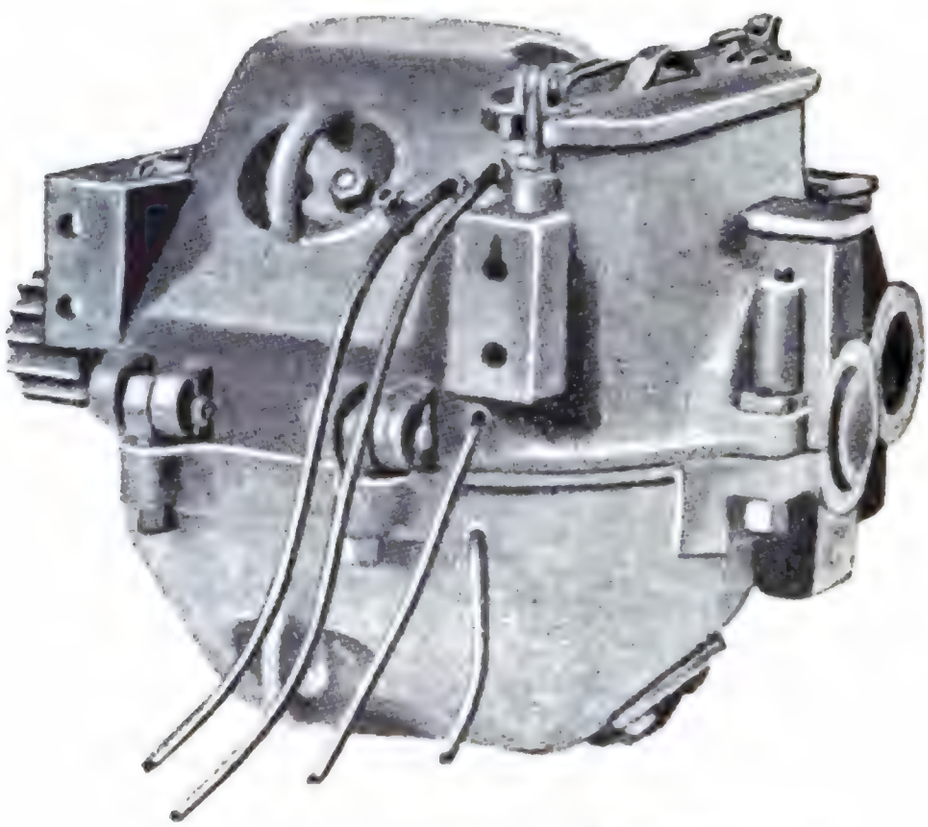


Fig. 67. Äußere Ansicht von Kapselmotoren.

Klappe zum Nachsehen und Reinigen der Bürsten. Das ganze Gehäuse ist im übrigen derartig so geschlossen, daß Feuchtigkeit, Schmutz und Staub nicht eindringen können, jedoch eine gewisse Abkühlung stattfindet.

Die Straßenbahnmotoren werden für Spannungen von 500—750 Volt gebaut, mit normaler Leistung von 8·5—200 P. S. Die geringste Spurweite, die man anwendet, ist 450 *mm*. Das Gewicht mit Zahnrädern und Schutzkasten ist je nach Größe 355—3000 *kg*. Das Übersetzungsverhältnis zwischen Motorwelle und Wagen-

Digitized by Google

achse ist je nach der verlangten Geschwindigkeit und Umdrehungszahl des Motors 1 : 3·83—1 : 5·44. Für Schmalspurbahnen muß eine besonders gedrängte Konstruktion des Motors angewendet werden, damit er zwischen den Wagenrädern Platz hat.

Teile eines Straßenbahnmotors.

Aufhängung	Motor[1])	Vorgelege
Joch, Jochwechsel, Jochbolzen, Ankerlagerdeckel, Achslagerschale, Achslagerschmierdeckel, Ankerlagerschmierdeckel, obere Hängefeder, untere Hängefeder, Hängefederteller, Hängefederbolzen, Hängeöse, Stellring, Erdschlußstück, Erdschlußbolzen.	Oberes Gehäuse, Unteres Gehäuse, Kommutatorklappe, Revisionsklappe, Feldspule, Ankerspule, Anker, Kollektor, Kollektor-Eisenscheibe, Kollektor-Isolierscheibe, Ankerkappe, Bürstenhalter, Bürstenbrücke, rechter } Bürstenkasten, linker } Bürstenklappe, Bürstenfeder, Bürstenhalterschraube, Spulenhalter, Spulenhalterschraube, Ankerlagerbüchse, Ankerlagerschraube, Ölschutzring, Kollektorsegment, Kollektormutter, Kappenmutter, Revisionsklappenmutter.	Zahnrad, Radschutzkasten, Zahntrieb, Triebfeder (Keil), Triebmutter, Triebscheibe, Zahnradbolzen, Zahnradfeder (Keil), Radschutzkastenbolzen, Radschutzkastenschraube, Radschutzkastenschmierdeckel, Revisionsstöpsel, Ösenbolzen, Gehäusebolzen, Verbindungsklemme.

[1]) Die Angaben weichen bei den verschiedenen Fabriken etwas ab, jedoch nur in den Nebenteilen, im allgemeinen sind sie bei allen Konstruktionen dieselben.

Gleichstrombahnmotoren normaler Ausführungsart.

Siemens & Halske A.-G., Berlin.

Abmessungen in Millimetern.

Motor	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o<	p	q≦	r	s	t	x*)
D 14/20	750	900	324	686	590	275	390	255	15	118	257	257	375	290	375	290	473	450	267	85
c D 17/18	800	830	348	718	615	325	420	290	40	107	293	298	400	315	350	320	487	420	263	85
c D 17/24	800	900	348	750	615	325	470	325	10	100	300	303	400	315	375	320	470	450	315	85
D 17/30	800	1240	348	772	560	324	450	282	5	110	310	314	400	315	540	310	660	630	353	85
c D 19/30	850	1240	396	825	605	345	495	270	40	110	335	335	445	345	490	345	695	590	410	80

a = Raddurchmesser
b = Breite mit Kasten über den Zahnrädern
c = Mitte Anker bis Mitte Radachse
d = Höhe über Schienenoberkante

*) x ist der Abstand zwischen Radschutzkasten und Schienenoberkante und richtet sich nach der Zahnradübersetzung; die Buchstaben über den Maßen beziehen sich auf Fig. 72 a—c.

Digitized by Google

Gleichstrommotoren für Motorwagen normaler Ausführungsart.

Siemens & Halske A.-G., Berlin.

Motortype	Normale Leistung P.S.	Umdrehungen per Minute bei normaler Leistung zirka	Betriebsspannung Volt	Kleinste Spurweite *mm*	Gewicht mit Zahnrädern und Schutzkasten *kg*
D 14/8·5 S.	8·5	810	500	450	385
gD 14/15 L.	13	560	500	560	600
gD 14/15 S.	19	690	500	560	600
D 14/20 L.	19	540	500	900	900
D 14/20 S.	22	700	500	900	925
gD 17/18 L.	22	520	500	685	900
cD 17/18 L.	22	520	500	900	925
gD 17/18 S.	27	770	500	685	900
cD 17/18 S.	27	770	500	900	925
cD 17/24 L.	27	530	500	1000	1200
cD 17/24 S.	42	570	500	1000	1200
D 17/30 L.	39	430	500	1435	1560
D 17/30 S.	48	580	500	1435	1560
D 17/30	52	800	750	1435	1560
cD 19/30	68	570	600	1435	1750
	85	720	750	1435	1750
D 150	100	370	600	1435	2250
	125	710	750	1435	2250
D 200	155	610	750	1435	2900

D 25/50 Spezialmotor für Bergbahnen.
L. bedeutet langsam, S. schnellaufend.

b) Die Stromabnehmer.

Für die Oberleitung auf Straßenbahnen sind drei verschiedene Stromabnehmer im Gebrauch. Des weiteren hat man Stromabnehmer für Unterleitungen und bei Hoch- und Tunnelbahnen Kontaktschuhe für die dritte Schiene neben oder zwischen den Geleisen.

Die Stromabnehmer für Oberleitung bestehen entweder in einer festen, nur um ihre wagerechte Achse beweglichen Rolle Konstruktion Sprague, oder in zwei beweglichen Achsen, einer wagerechten und einer senkrechten nach der Konstruktion von Dickinson.

Als Schleifkontakt ist auch der Siemenssche Bügel in Verwendung.

Die Spraguesche Kontaktrolle

besteht in einem bronzenen Kontakträdchen mit tiefer etwa parabolisch gestalteter Rinne (Fig. 73), die sich

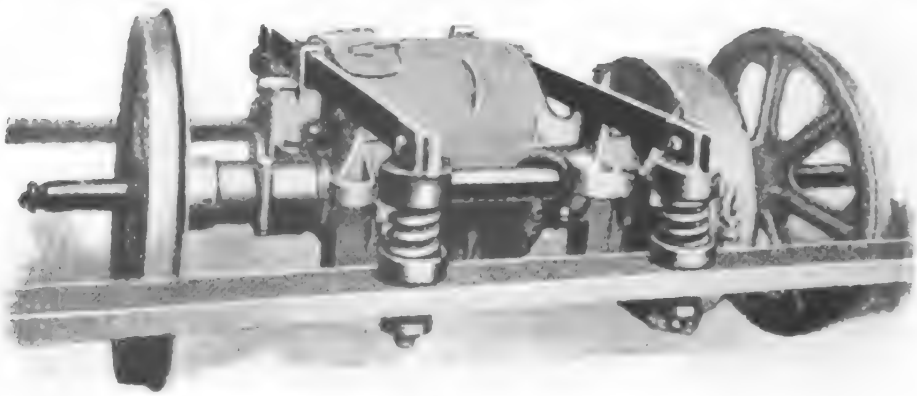


Fig. 68. Ansicht der federnden Aufhängung.

in einer Gabel um eine wagerechte Achse (Fig. 75) dreht. Diese Gabel ist an einer 3·75—4·4 *m* langen Kontaktstange (Kontaktrute), gewöhnlich aus Mannesmannrohr, angebracht. Das untere Ende der Kontaktstange ist in einem Kontaktständer verschiedenster Konstruktion, von denen einer in Fig. 74 dargestellt ist, befestigt, so daß dieselbe mit einem Druck von $2^1/_2$—5 *kg* gegen den Kontaktdraht drückt und auf den Endhaltestellen in rückwärtige schräge Lage umgelegt werden kann. Da die Kontaktrolle bis zu 400 Umdrehungen in der Minute macht, muß für gute Schmierung mit Öl, Fett oder Graphit gesorgt werden und hat man für diese Zwecke die verschiedensten Ein-

Digitized by Google

richtungen ersonnen. Auch der auf dem Wagendach angebrachte Kontaktständer muß gute Schmierung erhalten, damit die Stange in den Krümmungen den Abweichungen des Kontaktdrahtes aus der Mitte folgen kann.

Die Dickinson-Rolle.

Besonders in England und auch bei einigen Bahnen in Deutschland hat man mehrfach die nach Dickinson konstruierte Rolle angewendet, d. h. eine Rolle, die auf wagerechter Welle angeordnet auch um

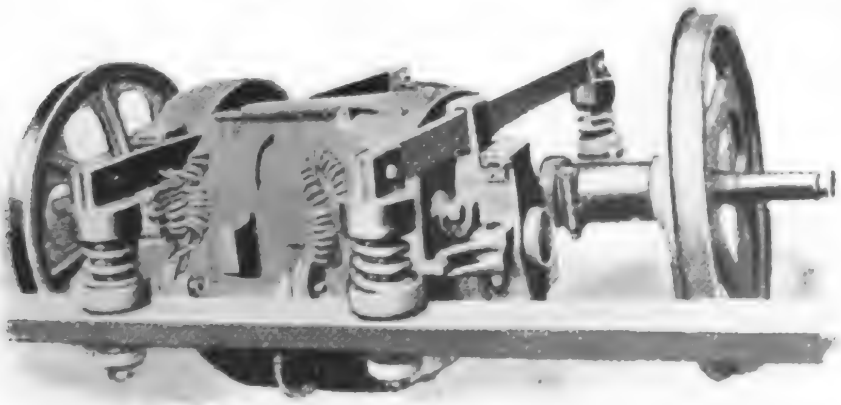


Fig. 69. Ansicht der federnden Aufhängung.

eine senkrechte Welle drehbar ist. Infolgedessen ist es möglich, einmal in Krümmungen des Geleises die Abspannung des Kontaktdrahtes mit größeren Abweichungen aus der Mitte anzulegen oder auch, wo es die Örtlichkeit erfordert, die Kontaktleitungen vollkommen seitwärts des Geleises anzubringen. Eine derartige Rolle ist in Fig. 76 abgebildet. Eine Kontaktrute dazu, die besonders für Decksitz-Wagen im Gebrauch ist, zeigt Fig. 77.

Der Siemens-Bügel.

Die sehr einfache und auch keiner größeren Abnützung als die Kontaktrolle unterworfene Einrichtung

Digitized by Google

wird von der Firma Siemens & Halske vielfach angewendet, wie z. B. auf der Dresdener Straßenbahn und einigen größeren Linien in Berlin. An Stelle einer einfachen Kontaktstange sind zwei Röhren angeordnet, die oben kreuzweise verbunden und mit einem ovalen Bügel, etwa in der Gestalt eines Korbbogens, versehen sind. Dieser Kontaktbügel wird entweder fest gelagert und nur in der Fahrtrichtung drehbar, wie in Fig. 78, angewendet, oder er ist auch um eine senkrechte Welle, wie die Kontaktrute auf dem Wagendach, drehbar (Fig. 79). Meistens ist er in der ersteren

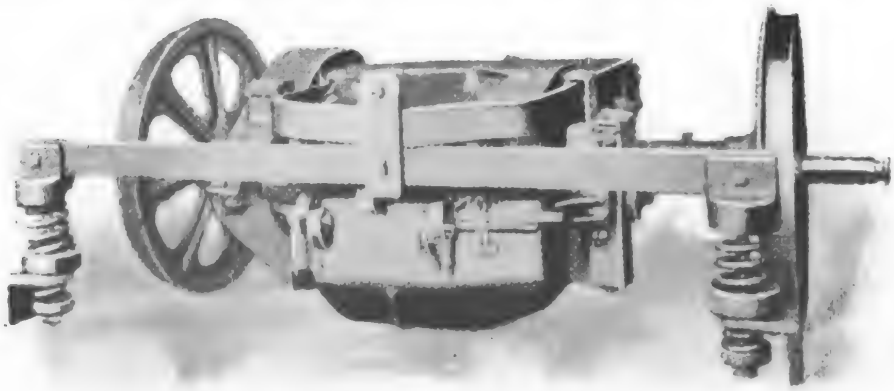


Fig. 70. Ansicht der federnden Aufhängung.

Gestalt im Gebrauch und dann so eingerichtet, daß er sich beim Wechsel der Fahrtrichtung in die hintere Lage selbsttätig umlegt. Häufig findet man die Ansicht verbreitet, daß der Bügel die Arbeitsleitung schneller abnützt als die Rolle. Nach den Erfahrungen in Dresden ist man jedoch zu der Überzeugung gekommen, daß der Bügelkontakt den denkbar günstigsten Einfluß auf die Haltbarkeit der Fahrdrähte hat. Der Schleifbügel verursacht infolge seiner leichten Konstruktion bei Kontaktschienen aus Weichmetall oder Aluminium, welche geschmiert werden, eine äußerst geringe Reibung und die Abnützung erstreckt sich nur auf das Anschleifen einer Fläche auf der Unter-

Digitized by Google

seite des Drahtes, welche die Kontaktfläche vergrößert und den Reibungsdruck vermindert. Die Rolle schleift dagegen oft mit ihren Flanschen an dem Arbeitsdrahte insbesondere in den Kurven. Demgemäß wird also der Arbeitsdraht beim Rollensysteme besonders an den Seiten und beim Bügelsysteme nur unten abgenützt. Die Abnützungsfläche stellt sich bald nach Betriebseröffnung der Bahn ein, schreitet aber kaum noch merkbar vorwärts, nachdem dieselbe bei Hartkupferdraht von 8 *mm* Durchmesser eine Breite von etwa 3 *mm* erreicht hat. Der Fortschritt der Abnützung

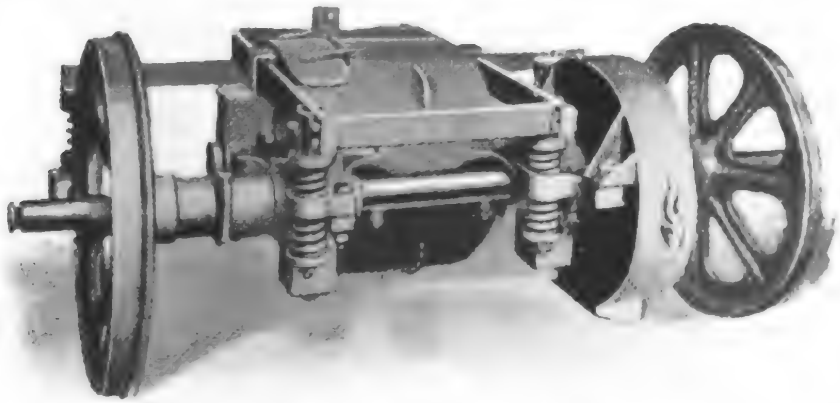


Fig. 71. Ansicht der federnden Aufhängung.

der Fahrdrähte ist in jährlich wiederkehrenden Messungen durch Mikrometer sorgfältig verfolgt worden, und es ist die anfangs schnellere, später kaum noch meßbare Abnahme des vertikalen Drahtdurchmessers unzweifelhaft festgestellt worden. Im Mittel hat nach vierjährigem Betriebe der letztere um 0·4 *mm* verloren, so daß der noch vorhandene Drahtquerschnitt noch über 96% des ursprünglichen beträgt. Viele lange Strecken des Fahrdrahtes in der Geraden weisen eine geringe Abnützung auf, während über Kurven, wo durch Schleudern des Wagens leicht ein seitliches Schwanken beziehungsweise Geigen des Bügels auftritt, und gleichzeitig stärkere Stromabnahme stattfindet,

Digitized by Google

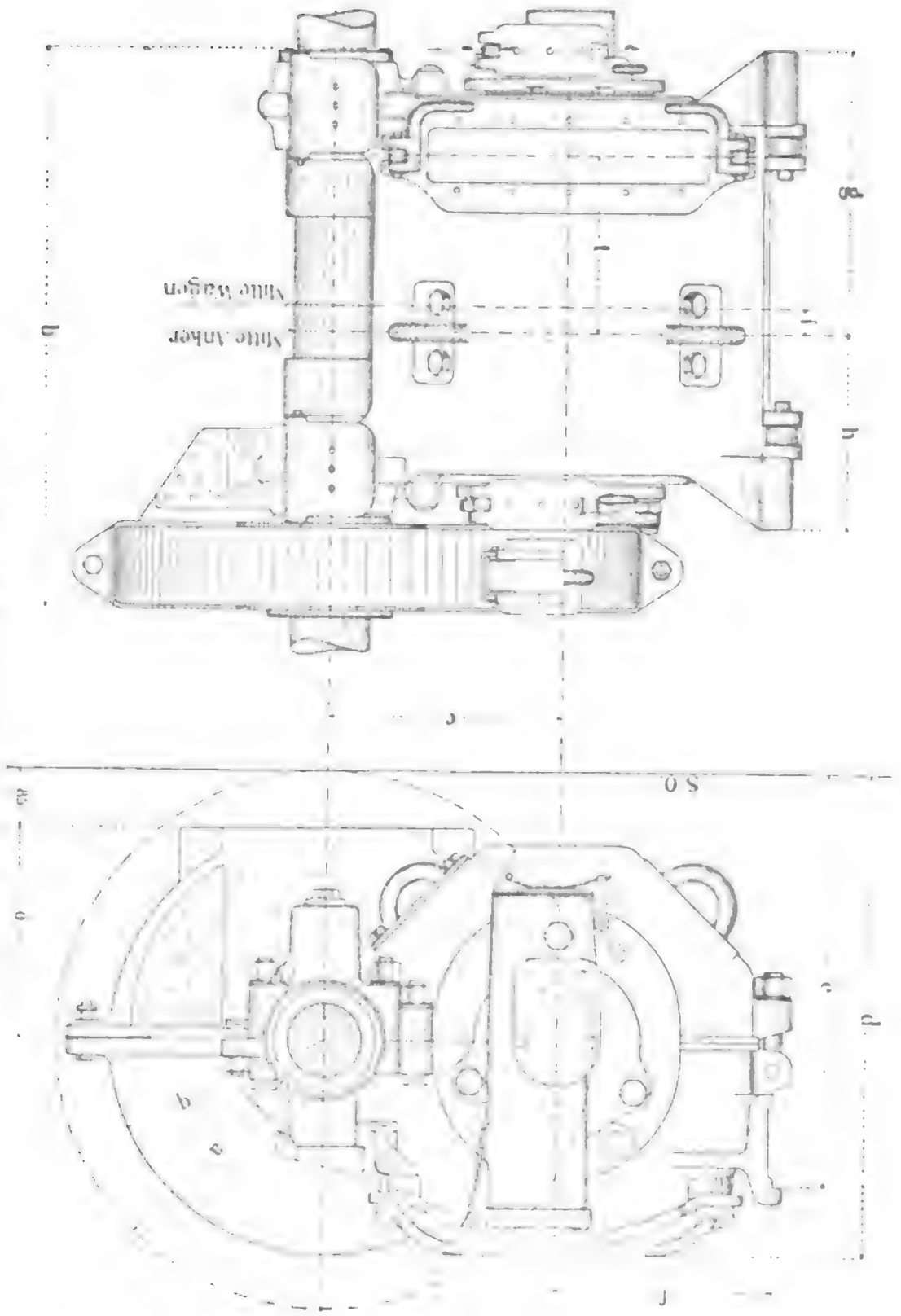


Fig. 72a und b. Siemensmotor mit Vorgelege.

Abnützungen des vertikalen Fahrdrahtdurchmessers um beinahe 1 *mm* festgestellt wurden. Ein Teil dieser über das vorige Maß hinausgehenden Abnützungsstellen, die überhaupt nur auf ganz kurzen Strecken — oft

Digitized by Google

nur von wenigen Zentimetern Länge — zu finden sind, ist unzweifelhaft auf Ungleichmäßigkeit in der Härte des Fahrdrahtes — vielleicht verursacht durch Ausglühen desselben bei einer Lötung — zurückzuführen.

Vorschriften für Bügelkontakt der Dresdener Straßenbahn.

1. Der Stromabnehmer muß in seinem oberen Teile die Form eines gleichschenkeligen, sphärischen Dreieckes mit abgerundeten Ecken haben.

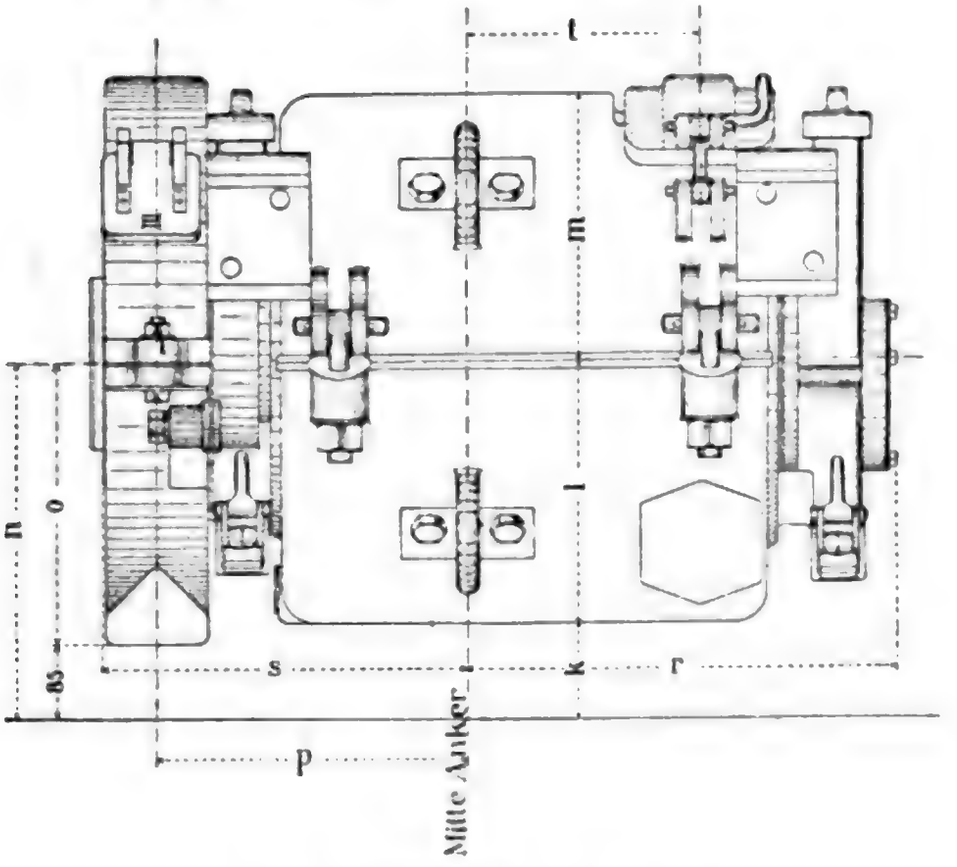


Fig. 72 c. Siemensmotor mit Vorgelege.

Die nach oben gerichtete Grundlinie des Dreieckes muß nach Abrundung der Ecken mit 7·5 *cm* Radius noch eine Breite von 1·40 *m* haben und nach einem Radius von 2·50 *m* gekrümmt sein.

Die Höhe des Dreieckes muß ungefähr 1 *m* und der Krümmungsradius der beiden Schenkelseiten 1·40 *m* betragen.

igitized by Google

Die Länge der auswechselbaren Kontaktschiene hat mindestens 1 *m*, nach jeder Seite der Mittellinie des Dreieckes, also mindestens 0·50 *m* zu betragen.

2. Um das Hängenbleiben des Stromabnehmers an der Leitung zu verhüten, dürfen an dessen Außenseite irgend welche Befestigungsteile nicht hervorstehen.

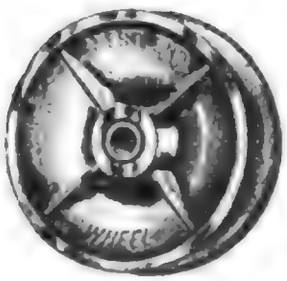


Fig. 73. Kontaktrad.

Der Stromabnahmebügel ist an dem Untergestell dergestalt zu befestigen, daß, wenn gleichwohl der Stromabnehmer an der Leitung hängen bleiben sollte, ein Herunterreißen der letzteren ausgeschlossen ist und daher eher der Stromabnehmer aus seiner Befestigung geht.

3. Die Mittellinie des unter 1 beschriebenen Dreieckes muß mit der Mittellinie des Wagens zusammenfallen, und es ist die Drehachse so zu lagern und das ganze Bügelgestell so stabil zu machen, daß auch bei den größten seitlichen Schwankungen des Wagens die höchste Weite der federnden Ausschlagungen des Bügels nach jeder Seite nicht über 5 *cm* beträgt.

4. Das Gewicht der Kontaktschiene darf 1 *kg* nicht überschreiten, während das Gewicht des Rohrgestelles bis zum Drehpunkte, einschließlich der Kontaktschiene, höchstens 10 *kg* betragen darf.

5. Die Abfederung des Bügels muß so beschaffen sein, daß derselbe an einem 5 *m* über der Straße gespannten Leitungsdraht mit einem Druck von höchstens 3·5 *kg* anliegt.

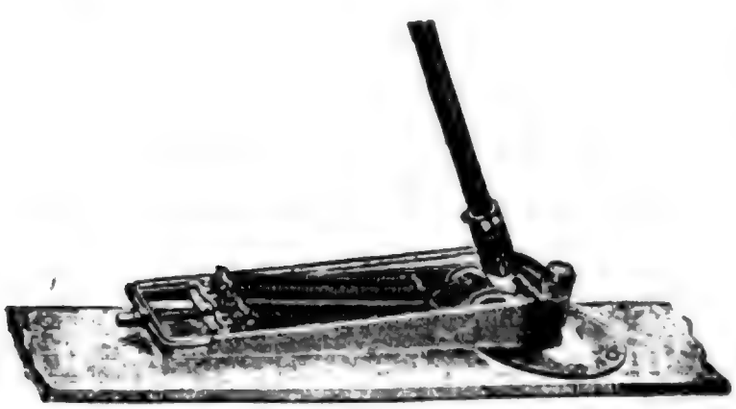


Fig. 74. Drehlager für Kontaktrute.

Dieser Druck darf sich auch bei Veränderungen der

Digitized by Google

Höhenlage des Fahrdrahtes in den Grenzen zwischen 4·5 und 5·3 *m* nicht wesentlich ändern.

Bei Anordnung der Federung des Bügels ist darauf Bedacht zu nehmen, daß eine Funkenbildung bei Abnahme des Stromes möglichst vermieden wird.

6. Der Bügel darf beim Umlegen unter einer Leitung von 5·1 *m* Höhe diese nicht mehr als 15 *cm* aufheben.

7. Ungefähr zwei Dritteile der in Betrieb befindlichen .Kontaktschienen müssen aus einem mit Weißmetall umgossenen Messing- oder Rotgußstab bestehen, ein Drittel dagegen aus zusammengenieteten Aluminiumblechstreifen, deren Zwischenräume abwechselnd mit Weißmetall und Fett gefüllt sind.

Fig. 75. Gabel für Kontaktrolle.

c) Die Fahrschalter und Schaltungen.

Da der innere Widerstand des Ankers der Elektromotoren sehr gering ist und erst in dem Augenblick, wo der Anker seine volle Umlaufgeschwindigkeit erreicht hat, eine gegenelektromotorische Kraft und somit ein scheinbarer Widerstand entsteht, ist die Anwendung von Hilfsvorrichtungen, nämlich von Anlaß-Widerständen für das Anfahren erforderlich, damit nicht zu hohe Stromstärken die Wicklungen des Ankers zerstören. Es ist außerdem erforderlich, daß man die Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers in weiten Grenzen verändern kann, um auf diese Weise die Fahrgeschwindigkeit

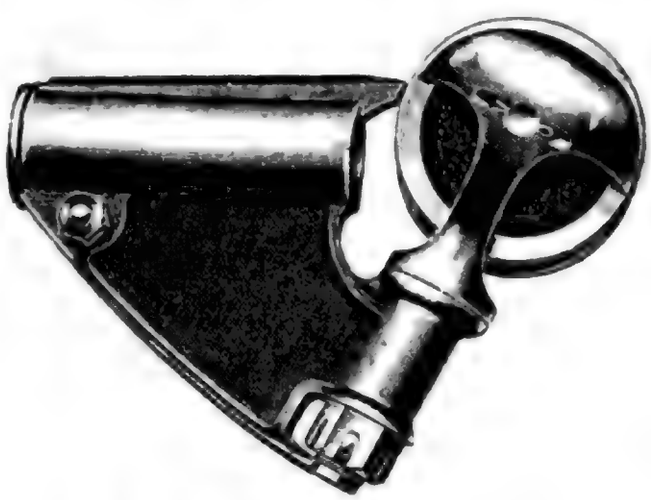


Fig. 76. Die Dickinsonrolle.

Fig. 77. Die Dickinsonrolle mit Kontaktrute.

des Wagens nach Bedarf zu wechseln oder die Wagen anzuhalten, beziehungsweise anzufahren. Für diese Zwecke verwendet man Regulierwiderstände, gewöhnlich aus Nickelin-Draht, die in Spiralen und Sätzen von gewissem Widerstand in eisernen Gehäusen auf Porzellan isoliert untergebracht sind.

Die Regulierung der Geschwindigkeit der Elektromotoren ist außerdem verschieden, je nachdem der Motorwagen mit 1 oder 2 Elektromotoren ausgerüstet ist. Bei 4 Elektromotoren pflegt man je 2 als eine Gruppe zu behandeln und also dieselbe Schaltung anzuwenden wie bei 2 Elektromotoren.

Die Änderung der Umlaufgeschwindigkeit und somit der Fahrgeschwindigkeit wird dadurch bewirkt, daß man bei einem Elektromotor die Stromstärke durch Vorschalten oder durch Abschwächen der Feldmagnete erzielt, indem man die Widerstände mit den Feldspulen in Nebenschluß schaltet. Das Vorschalten von Widerständen wird gebraucht beim Anfahren, die Nebeneinander-Schaltung mit den Feldspulen zum schnelleren Fahren.

Da das Vorschalten von Widerständen und auch die Anwendung von Widerständen überhaupt immerhin gewisse Energieverluste bedingt, so wendet man vielfach zwei Motoren an, die man dann in verschiedener Weise miteinander, wie auch mit den Widerständen kombinieren kann. Man erhält auf diese Weise die in Fig. 80 dargestellten sechs verschiedenen Verbindungen. Der Engländer Hopkinson hat diese Schaltungsweise

Digitized by Google

bereits in einem englischen Patent 1881 niedergelegt, während Anthony Reckenzaun sie zuerst bei seinen Akkumulatorenwagen anwandte und später auch in

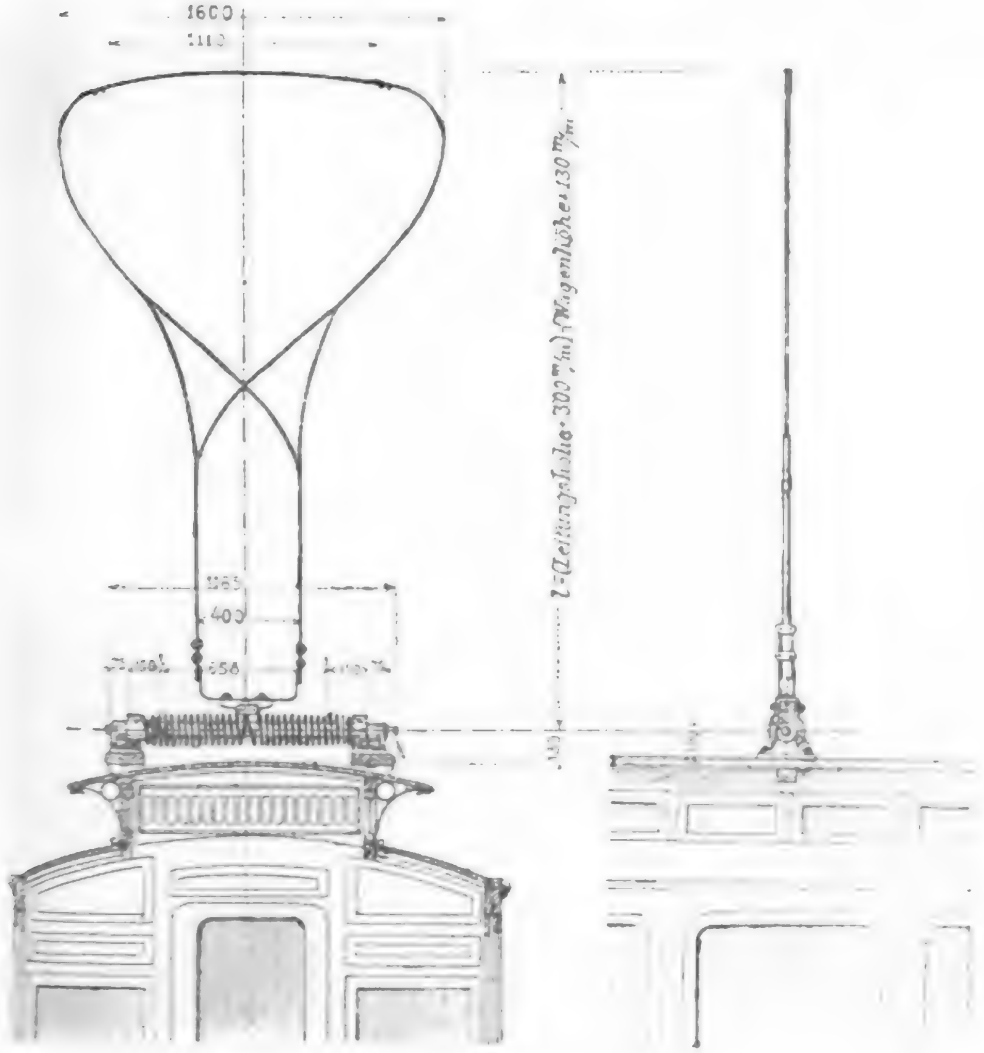


Fig. 78. Siemensbügel, fest.

Österreich ein Patent auf einen hiezu erforderlichen Schalter nachsuchte. Die mit zwei Motoren und einem Widerstande möglichen sechs Kombinationen sind folgende:

a) Bei einem Motor mit einem Widerstand in Reihe.

b) Ein Teil des Widerstandes ausgeschaltet.
c) Der ganze Widerstand ausgeschaltet.
d) Beide Motoren nebeneinander der Widerstand davorgeschaltet.

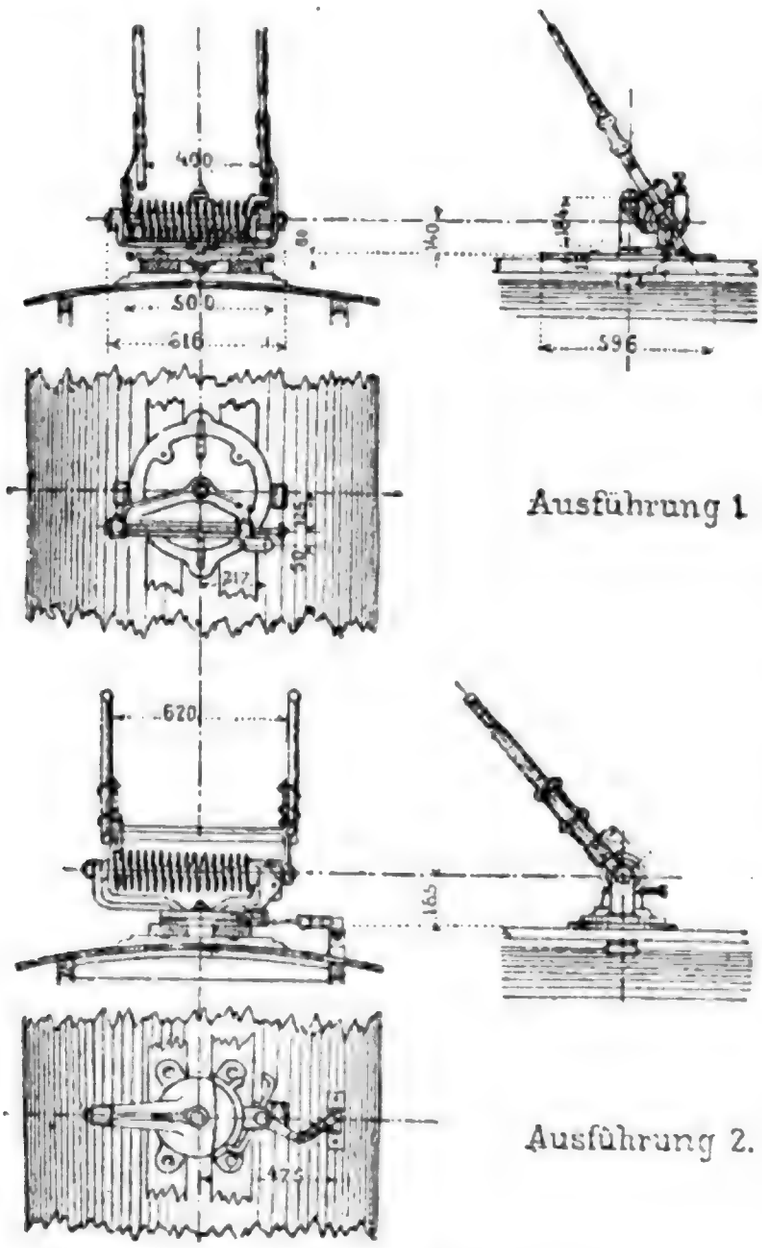


Fig. 79. Siemensbügel, drehbar.

e) Ein Teil des Widerstandes ausgeschaltet.
f) Der gesamte Widerstand ausgeschaltet,
so daß dann beide Motoren die volle Spannung in der Nebeneinander-Schaltung empfangen.

In der Praxis führt man diese Schaltung in der Weise aus, daß man beim Wechsel aus einer Stellung in die andere zunächst für einen Augenblick Widerstand vorschaltet und bei der nächsten Stufe denselben ganz oder teilweise abschaltet. Es geschieht dies hauptsächlich, um starke Funkenbildung zu vermeiden.

Die Fahrschalter im allgemeinen bestehen in einem auf der Plattform angebrachten Gehäuse (Fig. 81), in deren Innerem eine oder mehrere Schaltwalzen, beziehungsweise Kontaktwalzen, drehbar ge-

Digitized by Google

lagert sind, wie dies z. B. in der Fig. 82 nach der Konstruktion von Siemens & Halske dargestellt ist. Die von oben nach unten durchgehende Walze in der Mitte hat auf ihrem Umfange verschieden gestaltete Kontaktsegmente, auf denen seitlich eine Anzahl federnder Kontaktfinger aufliegt, so daß beim Drehen der oben angebrachten Kurbel die gewünschten Schaltungen ausgeführt werden. Rechts in dem Gehäuse ist außerdem noch eine geteilte Walze sichtbar, welche

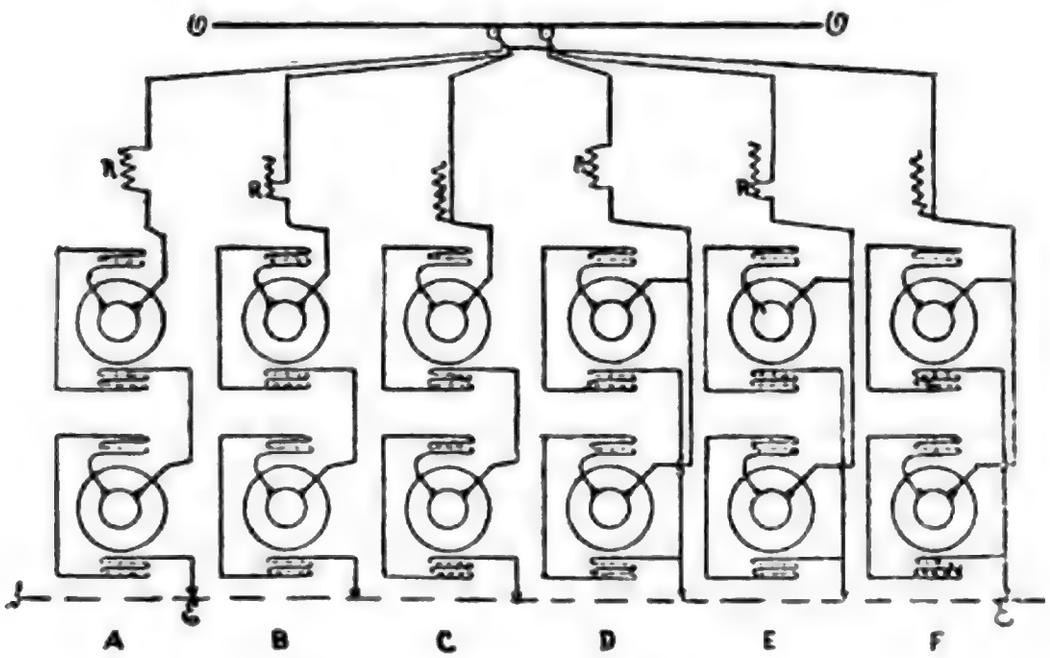


Fig. 80. Schaltung zweier Motoren.

zur Umkehrung der Fahrtrichtung dient, indem man die Stromrichtung am Anker durch Drehen der Walze umkehrt. Der Fahrschalter ist in Fig. 83 im Querschnitt und in oberer Ansicht nochmals dargestellt. Die untere Hälfte der rechten Walze dient zum Laden der Akkumulatoren bei gemischtem Betriebe und fällt bei direkter Stromzuführung fort.

Da man die Motorwagen vielfach so stark baut, daß sie einen oder mehrere Anhängewagen zu gleicher Zeit ziehen können, so sind gewisse Kuppelungen für die magnetischen Bremsen und die Beleuchtung

Digitized by Google

erforderlich. Die Fig. 84 stellt unter anderem zwei Wagen dar, von denen am Wagendach die Kuppelung *a* für die Beleuchtung und darunter *b* für die Magnetbremse dient. Der Kontakt für die Beleuchtung ist in Ansicht und Schnitt in Fig. 85 *a b* dargestellt. Eine Bremskuppelung zeigt Fig. 86 *a b*, links ist die Klappe der Kuppelungsdose gehoben, rechts ist sie geschlossen dargestellt. Eine Ansicht der Kuppelungen mit eingesetzten Doppelleitungen zeigt Fig. 86*c*.

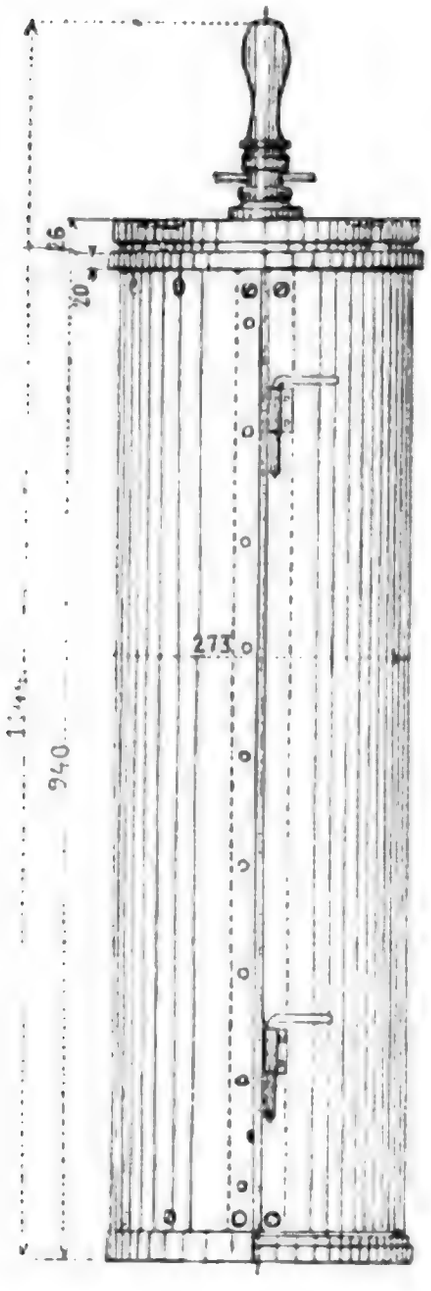


Fig. 81. Fahrschaltergehäuse.

Die sämtlichen Verbindungen (Montagezeichnung) zwischen den Fahrschaltern von denen je einer an den Enden des Motorwagens angebracht ist, sind nach einer Originalzeichnung von Siemens & Halske in Fig. 87 dargestellt, die nach den darin gegebenen Aufschriften ohne weiteres verständlich ist.

Jeder Wagen hat zur Sicherheit über dem Fahrschalter unter dem Dach des Wagens einen Handausschalter, der vielfach auch mit einem Selbstausschalter gleichzeitig kombiniert ist. Statt des Selbstausschalters wendet man jedoch auch Bleisicherungen an, die aber niemals so sicher wirken, wie die elektromagnetischen Selbstausschalter.

Bei der großen Zahl von Konstruktionen, den verschiedenen Bedürfnissen für Fahrzeuge und somit erforderlichen Abweichungen voneinander, ist es

Digitized by Goog

nicht möglich, hier alle diese verschiedenen Einrichtungen an Fahrschaltern zu beschreiben; nur die Funkenlösch-Einrichtung mag hier noch erwähnt werden, die bei allen Fahrschaltern angewendet zu werden pflegt.

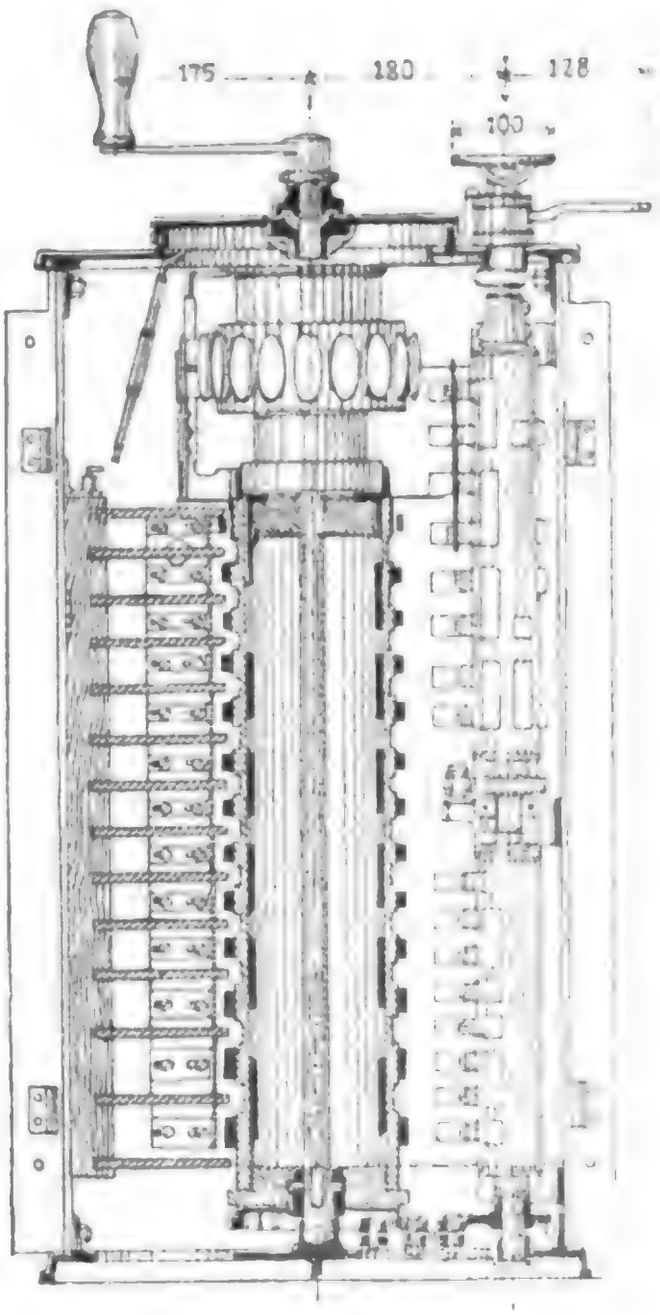


Fig. 82. Fahrschalter-Einrichtung.

Die Bewegung der Schaltkurbel und somit der Schaltwalze muß zur Vermeidung unnötiger Funkenbildungen von Kontaktknopf zu Kontaktknopf ruckweise geschehen, immerhin sind Funkenbildungen bei 500 Volt Spannung nicht zu vermeiden und hat man daher gewisse Einrichtungen getroffen, dieselben unschädlich zu machen, indem man entweder isolierende Scheiben zwischen die einzelnen Kontaktfinger und Kontaktsegmente setzt oder auch Blas-Magnete anwendet, d. h. flache Drahtspulen, von denen je eine zwischen je zwei Kontaktfingern angebracht ist und alle in einem Fahrschalter hintereinander eingeschaltet sind.

Digitized by Google

d) Beleuchtung und Heizung.

Die Beleuchtung der Wagen geschieht im allgemeinen mit Glühlampen. Der Wagen hat eine oder zwei Kopflaternen (Fig. 88, 89), eine Schlußlaterne und, je nach seiner Größe, mehrere Lampen im Inneren. Zuweilen hat man auch noch je eine Lampe auf der Plattform außen angebracht. In Berlin ist die Einrichtung derart getroffen, daß vorn zwei Kopflaternen vorhanden sind, von denen die eine eine große Ziffer zur Bezeichnung der Linien trägt. Außerdem geben beide Laternen durch Linsen noch Seitenlicht nach einem Kopfschild, das gewöhnlich dreieckig und drehbar ist, auf dem die Endstation der Linie angegeben wird. Um in einfacher Weise diese Lampen mit dem Betriebsstrom der Elektromotoren zu speisen, schaltet man fünf Lampen von je 100 Volt hintereinander, so daß der Wagen entweder 5 oder ein Mehrfaches von 5 Lampen erhält. Für Innenbeleuchtung dienen z. B. die Laternen Fig. 90.

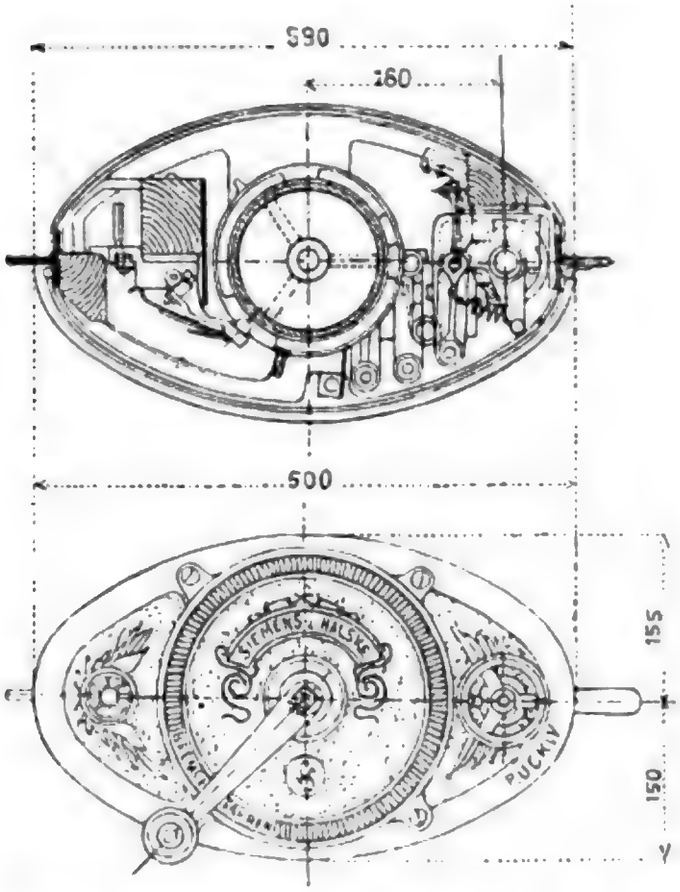


Fig. 83. Fahrschalter, obere Ansicht und Querschnitt.

In kalten Gegenden, in der gemäßigten Zone, ist im Winter Heizung der Wagen erforderlich, die entweder mit Glühstoff oder mit Elektrizität ausgeführt wird. Wo der elektrische Strom billig ist, kann man in

Digitized by Google

einfachster Weise elektrische Heizung anwenden, indem man entweder unter den Sitzen oder unter den Rückenlehnen Drahtwiderstände anbringt, durch deren Veränderung man die Wärme in weiten Grenzen regulieren kann.[1])

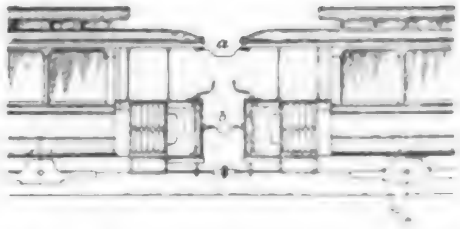
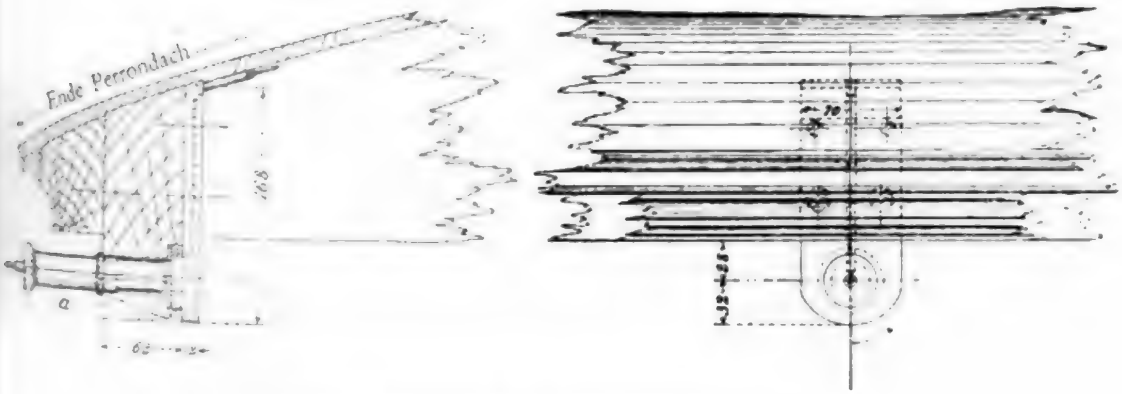


Fig. 84. Kuppelung zwischen zwei Wagen.

Blitzableiter.

Da sowohl die Motorwagen als auch insbesondere die Oberleitungen und eiserne Maste vielfach Blitzschlägen ausgesetzt sind, so pflegt man sie dagegen



85 a b. Kuppelung für Wagenbeleuchtung.

durch besonders konstruierte Blitzableiter zu schützen von denen jeder Motorwagen einen auf dem Dach enthält, während man die Oberleitungen etwa alle 500 *m* damit versieht. Eine vielfach gebrauchte Einrichtung ist der Hörner-Blitzableiter von Siemens & Halske (Fig. 91). Der eine Bügel wird zur Erde abgeleitet, der andere mit der Stromzuführung auf dem Dach des Wagens bei der Kontaktstange vereinigt.

[1]) S. Elektr. Mitteilungen 1902. Heft IV. S. 52—55: Neue elektr. Heizvorrichtungen der Allgem. Elektr. Gesellschaft.

Damit jedoch bei Einschlagen des Blitzes in einen Wagen nicht etwa dieser oder ein Elektromotor zerstört werde, ist bei der Wagenleitung dicht hinter der Kontaktstange eine Induktionsspule eingeschaltet,

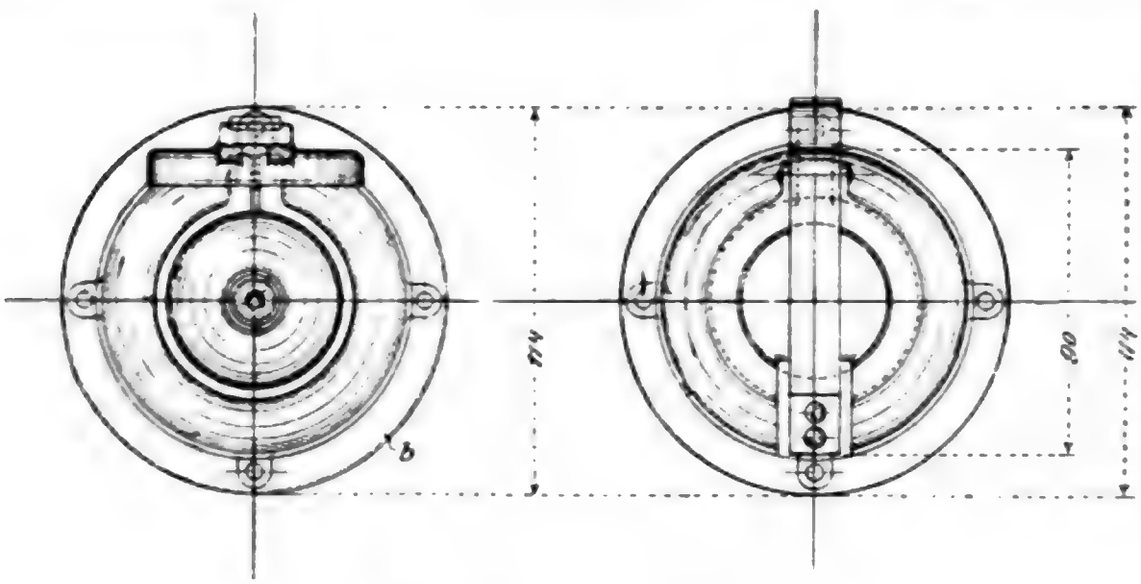


Fig. 86a. Kuppelung für Bremse.

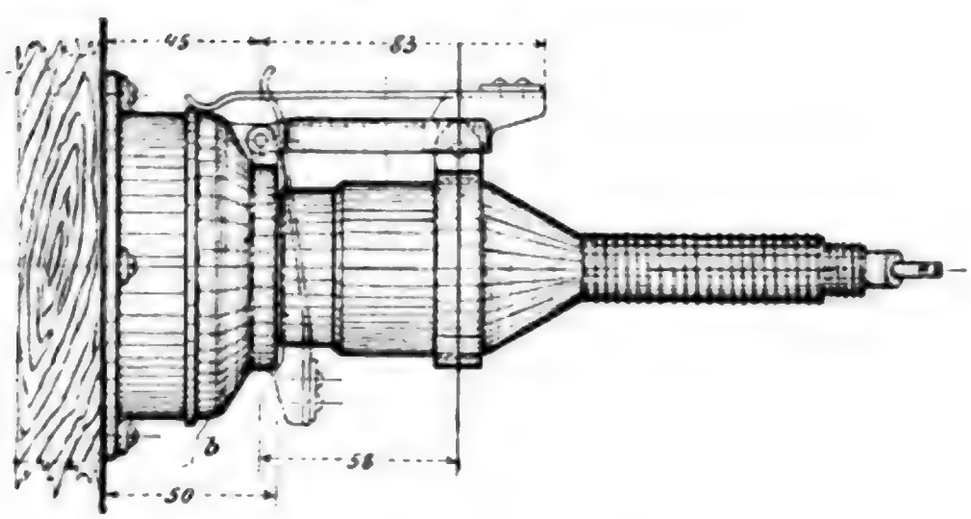


Fig. 86b. Kuppelung für Bremse.

welche aus etwa zehn Windungen starken Drahtes besteht, so daß eine Spule von etwa 10 *cm* Durchmesser gebildet wird. Die Selbstinduktion der atmosphärischen Entladung genügt, um Eindringen des Blitzes in den Wagen zu verhindern und ihn nach dem Hörner-Blitzableiter abzulenken.

Digitized by Google

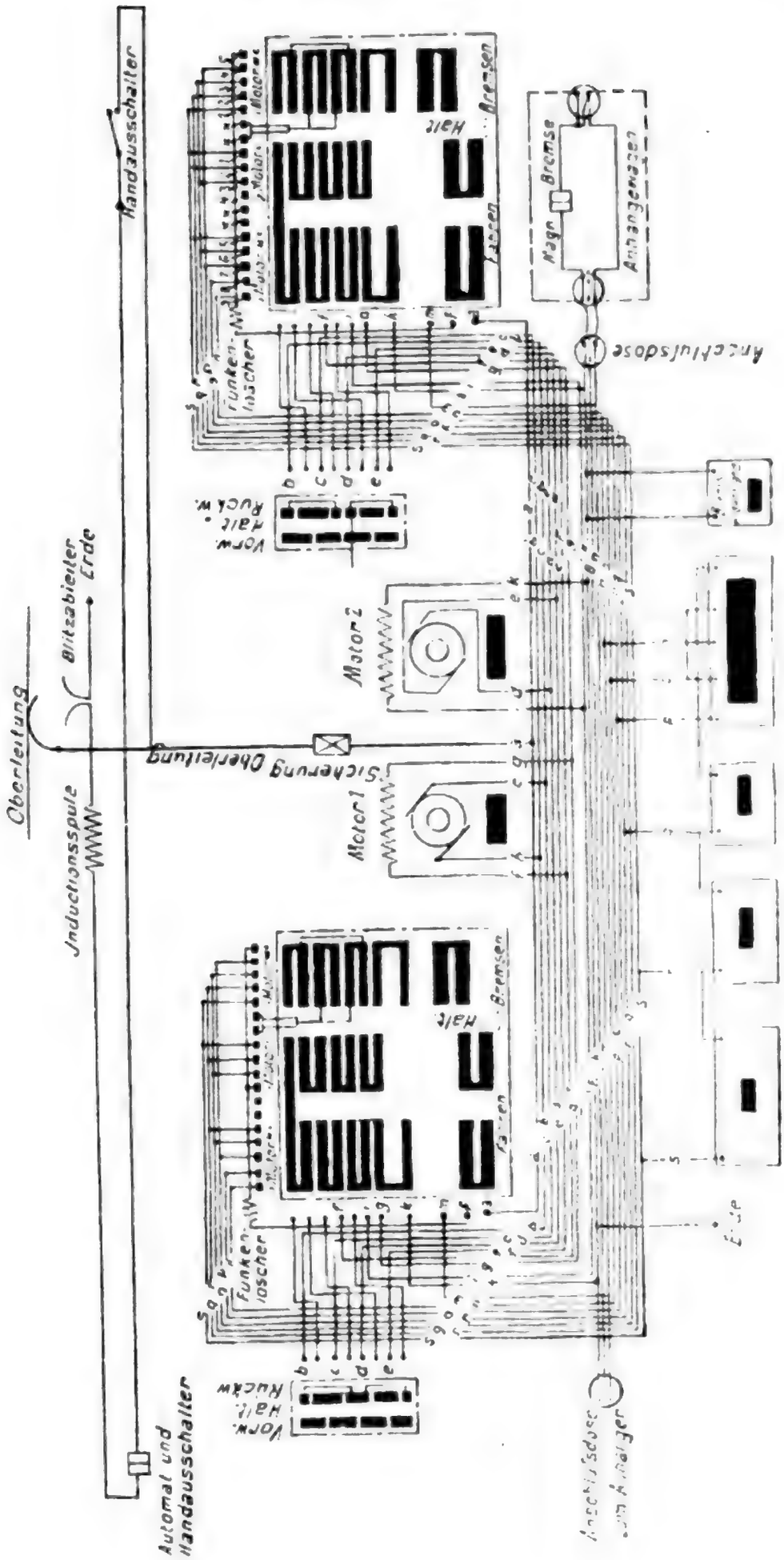


Fig. 87. Wagenschaltung von Siemens & Halske.

Digitized by Google

Die Wirkung dieses Blitzableiters ist in Fig. 92 dargestellt. Der zwischen den Metallbügeln auftretende Lichtbogen verlöscht sehr schnell, weil die Luft erwärmt ist und die von unten nachdringende kalte Luft den Lichtbogen schließlich unterbricht.

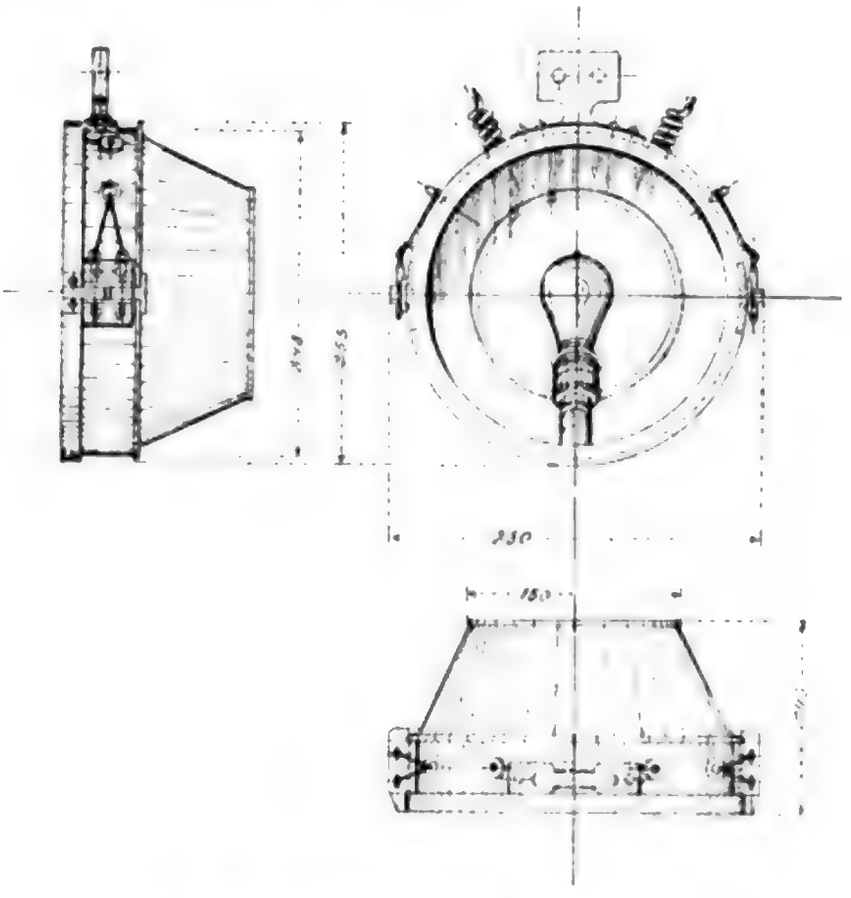


Fig. 88. Kopflaterne für eine Lampe.

Vorschriften für Führer von Motorwagen.[1])

Allgemeines.

Aufgabe des Wagenführes ist es, den Wagen gemäß dem Fahrplane zu handhaben. Derselbe ist verpflichtet, nach besten Kräften dafür zu sorgen, daß das Interesse des Dienstes gewahrt wird. Höfliches Benehmen gegen das Publikum wird ihm zur Pflicht gemacht. Ist Gefahr im Anzuge, so hat derselbe ener-

[1]) Nach »Elektr. Verkehrstechnik« von Joh. Zacharias. Costenoble Jena.

Digitized by Google

gisch einzuschreiten, um dieselbe abzuwenden. Jedem Wagenführer wird nach erfolgter Aufnahme mitgeteilt, wen er als seinen Vorgesetzten zu betrachten hat. Den Anordnungen desselben hat er pünktlich und willig Folge zu leisten. Im Dienste ist darauf zu sehen, daß die Polizeiverordnungen befolgt und die sonstigen

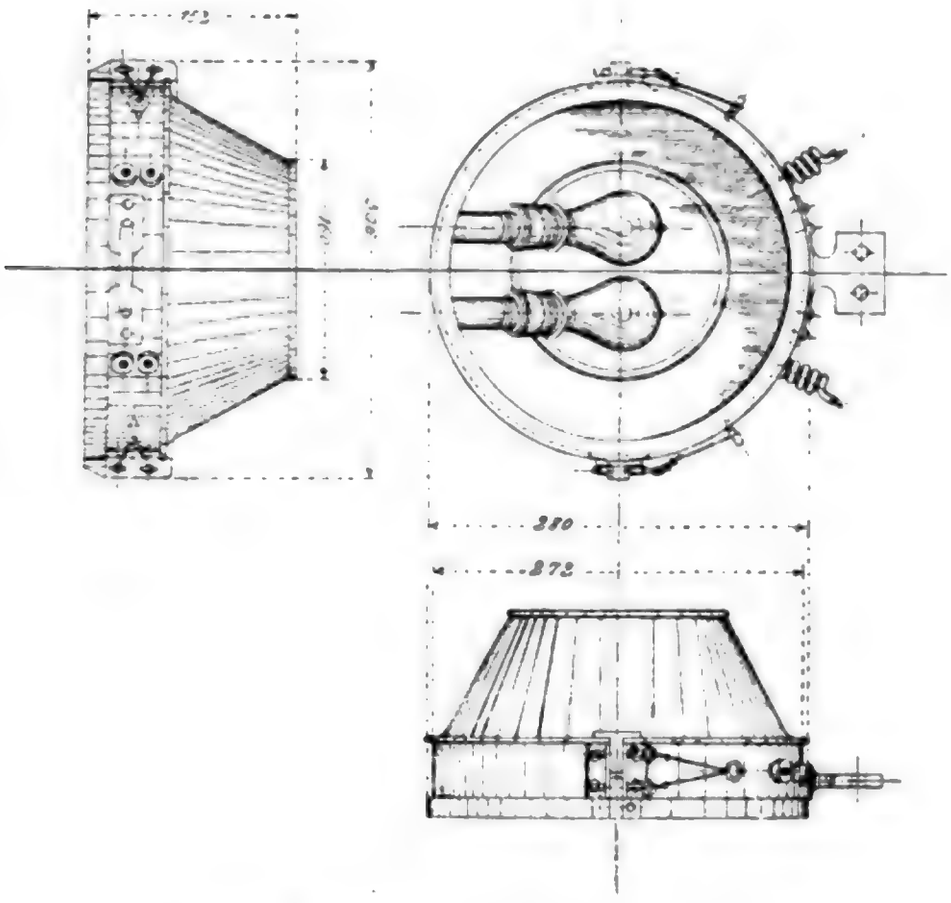


Fig. 89. Kopflaterne für zwei Lampen.

behördlichen Vorschriften eingehalten werden. Der Wagenführer erscheint im Dienste stets in der vorgeschriebenen Kleidung, welche sich in sauberem, ordentlichem Zustande befinden soll.

Befehle werden in der Regel mündlich erteilt, außerdem jedoch sind die am schwarzen Brett oder in einem besonderen Befehlbuche mitgeteilten Weisungen der Vorgesetzten zu befolgen. Denselben ist auch dann nachzukommen, wenn sie sich auf Dienst-

leistungen zu außergewöhnlichen Zeiten beziehen. Damit solche Anordnungen rechtzeitig bekannt gemacht werden können, hat jeder Wagenführer seine Wohnung in dem Betriebszimmer anzugeben und bei Wohnungsveränderungen den Umzug rechtzeitig zu melden.

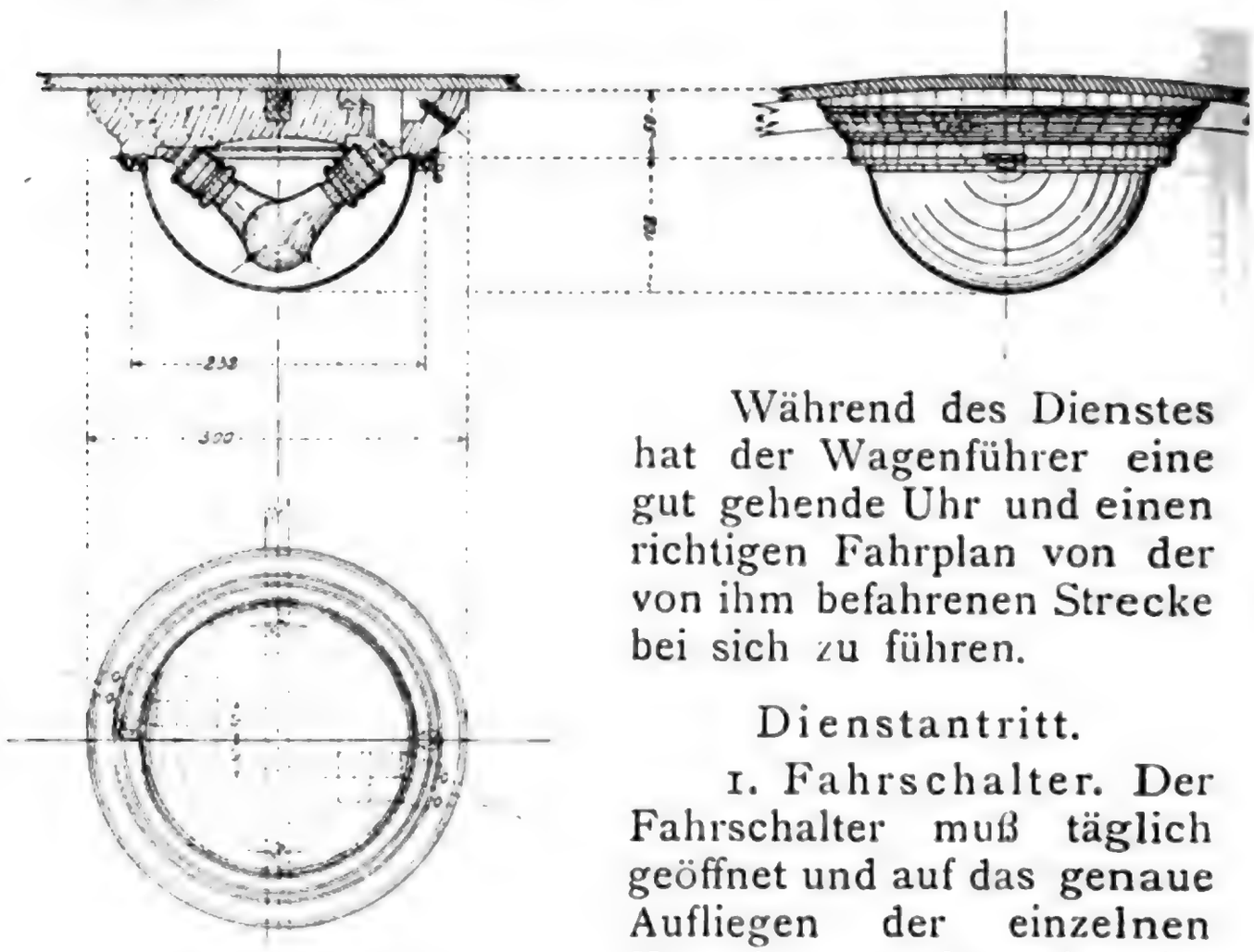


Fig. 90. Innenlaternen.

Während des Dienstes hat der Wagenführer eine gut gehende Uhr und einen richtigen Fahrplan von der von ihm befahrenen Strecke bei sich zu führen.

Dienstantritt.

1. Fahrschalter. Der Fahrschalter muß täglich geöffnet und auf das genaue Aufliegen der einzelnen Kontakte geprüft werden, indem nach Öffnen des Notschalters die Regulierwalze mehrfach vor und rückwärts gedreht wird, wobei auf gutes Aufliegen der Kontakte sorgsam zu achten ist.

Die Kontaktstellen müssen stets metallisch rein und blank sein; leichte Brandstellen sind mit Schmirgelleinen oder der in jedem Wagen befindlichen Schlichtfeile zu entfernen. Kein Teil des Fahrschalters darf mit Öl geschmiert werden.

Digitized by Google

2. Bremse. Die Bremse muß so eingestellt sein, daß der Wagenführer in dem Augenblicke, wo die Bremsbacken die Räder angreifen, im stande ist, mit voller Kraft an dem Hebel zu drücken. Die Backen selbst müssen des Morgens noch so stark sein, daß

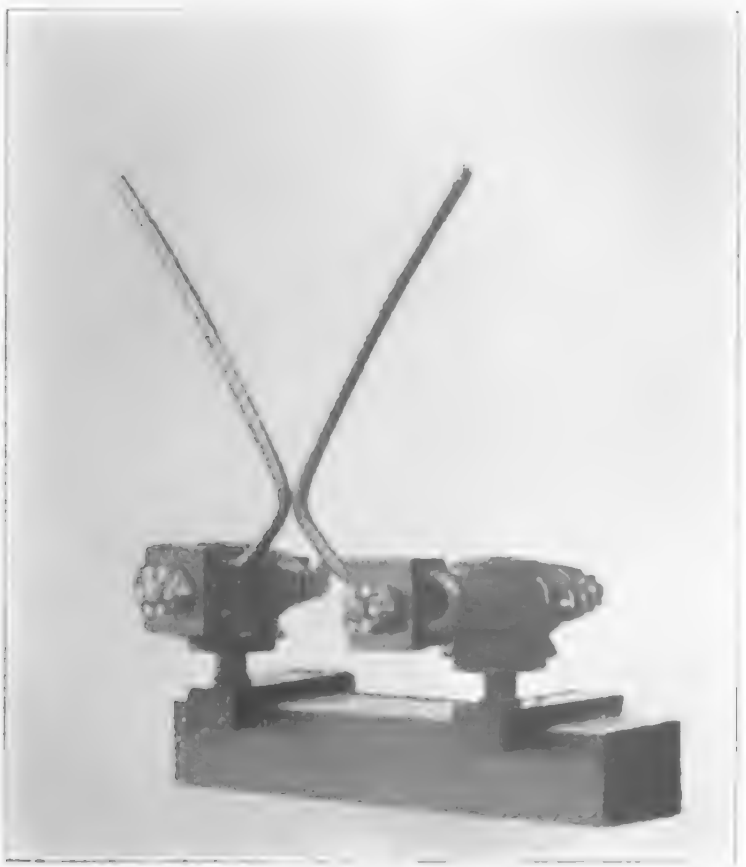


Fig. 91. Hörnerblitzableiter

sie mit Sicherheit im stande sind, den Dienst zu verrichten. Ein Wagen, an dem die Bremsbacken soweit abgenutzt sind, daß sie der obigen Bedingung nicht entsprechen, darf nicht in Betrieb genommen werden, da durch das Versagen der Bremse Unfälle hervorgerufen werden können.

Digitized by Google

wortlich. Zum Inventar gehören insbesondere als Reserve Bleisicherungen für den Hauptstrom, für Licht und eine Glühlampe. Es ist Aufgabe der Nachtschicht, dafür zu sorgen, daß alle diese Arbeiten ordnungsmäßig besorgt sind, wenn der Wagenführer den Dienst antritt. Findet sich, daß ein Teil derselben mangelhaft oder gar nicht durchgeführt ist, so hat der Wagenführer hierüber Meldung zu erstatten.

Hat der Führer den Wagen übernommen, so trägt derselbe die Verantwortung für etwaige Begebnisse während der Dienstzeit. Selbst dann, wenn der Wagen in nicht ordnungsmäßigem Zustande übernommen wurde, trägt der Führer die Verantwortung, da derselbe verpflichtet ist, diesen Zustand zur Anzeige zu bringen und auf Verbesserung vor Übernahme des Wagens zu dringen.

Fahrdienst.

Bevor der Wagen das Depot verläßt, muß der Führer sich überzeugen, daß die Bremsen auf beiden Perrons lose sind.

Beim Anfahren des Wagens muß der Führer stets ein Signal mit der Glocke geben. Während der Fahrt muß er stets sein Augenmerk auf die Straße richten und darauf achten, daß der Fahrt keine Hindernisse entgegenstehen, insbesondere, daß die Weichen richtig gestellt und die Geleise frei von Gegenständen sind, welche eine Beschädigung der Wagenausrüstung zur Folge haben könnten. Wartet ein Wagen in der Weiche, so darf er aus derselben nicht früher abfahren, als bis der entgegenkommende Wagen die Einfahrtsweiche vollständig passiert hat.

Falls der Wagen beim Anfahren versagt, ist zu untersuchen:

1. ob die Fahrrolle unter dem Fahrdraht sitzt,
2. ob beide Notausschalter geschlossen,

Digitized by Google

3. ob die Schmelzsicherung in Ordnung,

4. ob der Umkehrhebel gänzlich bis ans Ende gedreht,

5. ob überhaupt Strom vorhanden, zu prüfen durch Einschalten der Lampen,

6. ob zwischen Rädern und Schienen ein vollständiger metallischer Kontakt vorhanden,

7. ob alle Verbindungen in Ordnung.

Während der Fahrt befindet sich die rechte Hand des Führers stets an der Bremskurbel, die linke an der Fahrschaltkurbel.

Bei Anfahren des Wagens ist die Fahrschalterkurbel ruckweise von Marke zu Marke zu drehen, bis die gewünschte Fahrgeschwindigkeit erreicht ist.

Der Führer darf sich weder auf die Brems- und Fahrschalterkurbel stützen, noch letztere zwischen zwei Kontakten stehen lassen. Um den Wagen in Gang zu setzen, ist die Kurbel nach rechts zu drehen. Bei Handhabung der Kurbel ist folgendes genau zu beachten:

Die Fahrschalterkurbel darf niemals bewegt werden, ehe die Bremsen gelöst sind. Die Bremsen dürfen niemals angezogen werden, bevor die Fahrschalterkurbel auf »Aus« steht.

Vor Abfahrt des Wagens ist stets zuerst die Bremse zu lösen, die Umkehrkurbel richtig zu stellen, die Notausschaltung zu schließen.

Zum Verringern der Fahrgeschwindigkeit ist die Fahrschalterkurbel schnell zurückzudrehen. In Weichenkrümmungen und Kreuzungen, in Strecken mit Gefälle und beim Scheuen von Zugtieren ist die Geschwindigkeit stets entsprechend zu verringern.

Zum Anhalten des Wagens ist die Fahrschalterkurbel bis auf »Aus« zurückzudrehen und dann die Bremse anzuziehen. Zum raschen Anhalten in Fällen dringender Gefahr ist die Fahrschalterkurbel bis auf

Digitized by Google

»Aus« schnell zurückzudrehen, die Umkehrkurbel auf »Zurück« zu stellen, die Fahrschalterkurbel wieder auf Marke 1 zu drehen, bis der Wagen sich nach rückwärts bewegt, dann ist sogleich die Fahrschalterkurbel auf »Aus« zu drehen und die Bremse anzuziehen.

Von diesem Mittel ist aber nur in Fällen dringender Gefahr Gebrauch zu machen. Der Führer, welcher bei gewöhnlichem Betrieb Gegenstrom ausgibt, anstatt sich der Bremse zu bedienen, wird bestraft, im Wiederholungsfalle entlassen.

Sollten irgendwelche Unregelmäßigkeiten vorkommen, oder der Wagenführer merken, daß die Regulierkurbel bei dem Abstellen des Stromes nicht mehr wirkt, so ist unverzüglich mit schnellem Ruck der Notausschalter, der sich an der Decke des Perrons befindet, herauszuziehen, wodurch der Stromkreis sofort unterbrochen wird. Alsdann ist sofort zu bremsen.

Bei genügendem Gefälle in Luftweichen und Kreuzungen ist ohne Strom zu fahren. Hierzu ist die Kurbel auf »Aus« zu stellen. Bei Gefälle ist die Fahrgeschwindigkeit mit der Bremse zu regulieren. Beim Entgleisen der Kontaktrolle oder sonstigen außergewöhnlichen Vorkommnissen ist die Fahrschalterkurbel schnell bis auf »Aus« zurückzudrehen, die Bremse anzuziehen, die Rolle wieder anzulegen.

Im Falle einer Entgleisung ist der Wagen, wenn tunlich, mittels des Stromes wieder in die Geleise zurückzubringen. Bevor der Führer dies aber versucht, hat er sich davon zu überzeugen, daß nicht durch eine Beschädigung (Verbiegung einer Achse etc.) eines der Räder verhindert ist, sich frei zu drehen, weil in letzterem Falle der Motor überlastet werden würde. Können die Räder sich nicht frei drehen, so

ist der Wagen durch Wagenwinden wieder in das Geleise zurückzubringen.

Beim Verlassen des Wagens auf der Endstation ist die Fahrschalterkurbel auf »Aus« zu stellen, die Bremse fest anzuziehen, der Notausschalter in der späteren Fahrtrichtung zu öffnen, Fahrschalterkurbel und Umkehrhebel abzunehmen und der Stromabnehmer umzulegen.

Beim Verlassen des Wagens im Wagenschuppen ist die Fahrschaltkurbel auf »Aus« zu stellen, der Notausschalter zu öffnen, Fahrschaltkurbel und Umkehrhebel abzunehmen, die Bremse zu lösen.

Wenn bei nassem Wetter die Räder gleiten, so ist der Sandstreuer zu benutzen, welcher aus diesem Grunde stets in gebrauchsfähigem Zustande sein muß.

Läßt sich die Fahrschalterkurbel nicht auf »Aus« zurückbringen oder bemerkt der Führer nach Ausschalten des Kontrollers irgend welche Unregelmäßigkeiten an demselben, so ist unverzüglich mittels des Notausschalters auszuschalten.

Zum Rangieren darf nie die Umkehrkurbel, sondern nur der Fahrschalter des in der Fahrtrichtung gelegenen Perrons benutzt werden. Halten in Kurven, besonders in Weichen-Einfahrten, sowie auf größeren Steigungen außerhalb der Haltestellen ist untersagt.

Der Stromabnehmer

muß nach allen Richtungen leicht beweglich sein. Die Rolle muß leicht laufen und darf nicht am Fahrdraht schleifen. Macht sich während der Fahrt ein rasselndes Geräusch an der Rolle bemerkbar, so ist dies abends dem Maschinenmeister zu melden.

Die Bleisicherung

kann abschmelzen infolge zu starker Belastung der Motoren, sowie durch Fehler innerhalb der Motoren

Digitized by Google

oder der Stromleitungen des Wagens. Schmilzt eine Bleisicherung, so ist sofort der Notausschalter zu öffnen und eine neue Bleisicherung einzusetzen.

Der Führer muß dem nächsten Kontroller sofort von dem Schmelzen der Bleisicherung und deren mutmaßlicher Ursache Meldung machen und eine neue Bleisicherung verlangen.

Blitzableiter.

Bei Gewitter sind stets die Glühlampen einzuschalten.

Der Blitzableiter ist nach jedem Gewitter zu untersuchen. Hierzu wird die Kontaktstange flach auf das Wagendach herabgezogen und erst dann die Spindel aus ihrer Fassung herausgenommen. Dieselbe ist, wenn durch Blitzschlag beschädigt, sobald als möglich auszuwechseln.

Läuft ein Lager heiß, so ist dasselbe häufig zu schmieren. Sollte durch das Schmieren die Erhitzung nicht vermindert werden, so ist der Wagen außer Betrieb zu setzen.

Glockensignale

sind zu geben bei Abfahrt des Wagens, vor Passieren von Straßenkreuzungen, sowie sobald der Führer bemerkt, daß sich Personen oder Fuhrwerke auf der Bahnstrecke zu nahe befinden.

Fahrgeschwindigkeit.

Der Wagenführer erhält einen für seinen Wagen bestimmten Fahrplan. Die auf demselben angegebenen Ankunfts- und Abfahrtszeiten sind genau einzuhalten. Wird die freie Fahrt durch Fuhrwerke oder sonstige Hindernisse zeitweilig gehindert, so ist die Versäumnis durch erhöhte Geschwindigkeit auf dem geradlinigen Teil der Strecke nach Möglichkeit wieder einzubringen.

Digitized by Google

In Kurven von Straßenkreuzungen und bei der Einfahrt in Weichen ist langsam zu fahren. Vor der Einfahrt in die letzteren ist der Strom mittels des Fahrschalters auszuschalten.

Begegnen sich zwei Wagen an den Ausweichstellen, so ist darauf zu achten, daß beide nie gleichzeitig anfahren dürfen.

* * *

Für gemischten Betrieb sind diese Vorschriften entsprechend zu erweitern, auch bezüglich der Kurzschlußbremsen, Magnetbremsen, Lade- und Entladestrecken der Batterien.

e) Sicherheitsvorrichtungen.

Der elektrische Betrieb der Straßenbahnwagen erfordert aus mehrfachen Gründen sehr wirksame Bremsvorrichtungen, wie man sie früher bei den älteren Pferdebahnwagen nicht notwendig hatte.

Während bei diesen die Handbremse (Fig 93) genügte, ist man jetzt genötigt, mechanisch wirkende Bremsen anzuwenden, bei denen es nicht auf Kraftäußerung des Wagenführers ankommt. Zu diesen gehören: die elektrische Kurzschlußbremse, die magnetische Bremse, die Luftdruckbremse und die Schienenbremse. Neuerdings ist auch noch eine andere Konstruktion von dem schwedischen Ingenieur Lundell zur Ausführung gekommen, bei welcher der Elektromotor dadurch Arbeit leistet und also gebremst wird, daß er als Dynamomaschine Strom in die Leitung sendet.

Die elektrische Kurzschlußbremse wirkt in der Weise, daß an dem Fahrschalter gewisse Stufen, etwa 2—4, angeordnet sind, die dazu dienen, die Elektromotoren des noch laufenden Wagens, bei dem jedoch die Stromzuführung bereits abgeschaltet ist,

Digitized by Google

als Dynamos arbeiten zu lassen, indem man sie auf die Vorschaltwiderstände des Wagens schaltet, die sonst für das Anfahren und für die Regulierung der Fahrgeschwindigkeit dienen.

Naturgemäß müssen einige Abstufungen in den Widerständen vorhanden sein, damit das Bremsen nicht ruckweise und plötzlich erfolgt und auch die Elektromotoren, wenn sie als Stromerzeuger laufen, nicht zu stark beansprucht werden.

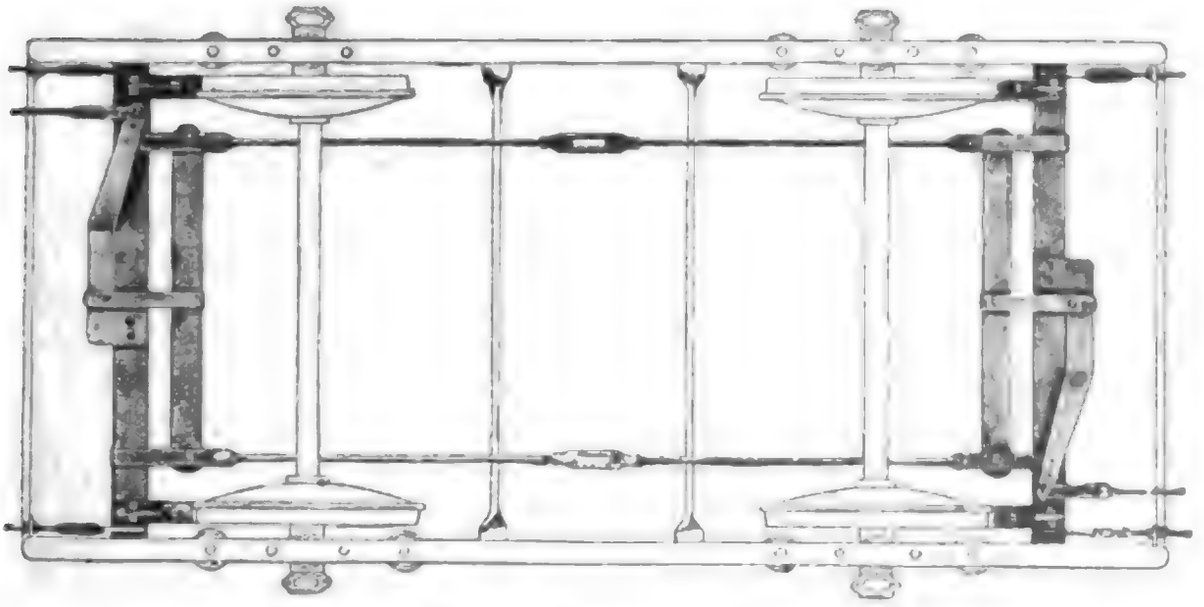


Fig. 93. Handbremse.

Die Art dieser Bremsung ist jedoch nur für leichtere Wagen und für schwächeren Verkehr geeignet. Bei dem fortwährenden Anhalten und Anfahren in verkehrsreichen Straßen der großen Städte ist diese Art der Bremsung den Elektromotoren nicht zuträglich, weil sie durch das fortwährende Einschalten auf kurzen Schluß sehr bald warm werden und hierdurch schließlich Schaden leiden können, es wird außerdem die ganze Konstruktion des Motors ziemlich stark beansprucht.

Man hat infolgedessen nach der Erfindung von Sperry die elektromagnetische Bremse Fig. 94 a

Digitized by Google

bis 94 c eingeführt, bei welcher die Elektromotoren zwar gleichfalls als Stromerzeuger laufen, jedoch nicht allein auf Widerstände in kurzem Schluß arbeiten, sondern gleichzeitig den erzeugten Strom nach eigenartig gestalteten Elektromagneten senden, welche eine Bremsscheibe, die fest auf der Wagenachse aufgekeilt ist und als eiserner Anker der Elektro-

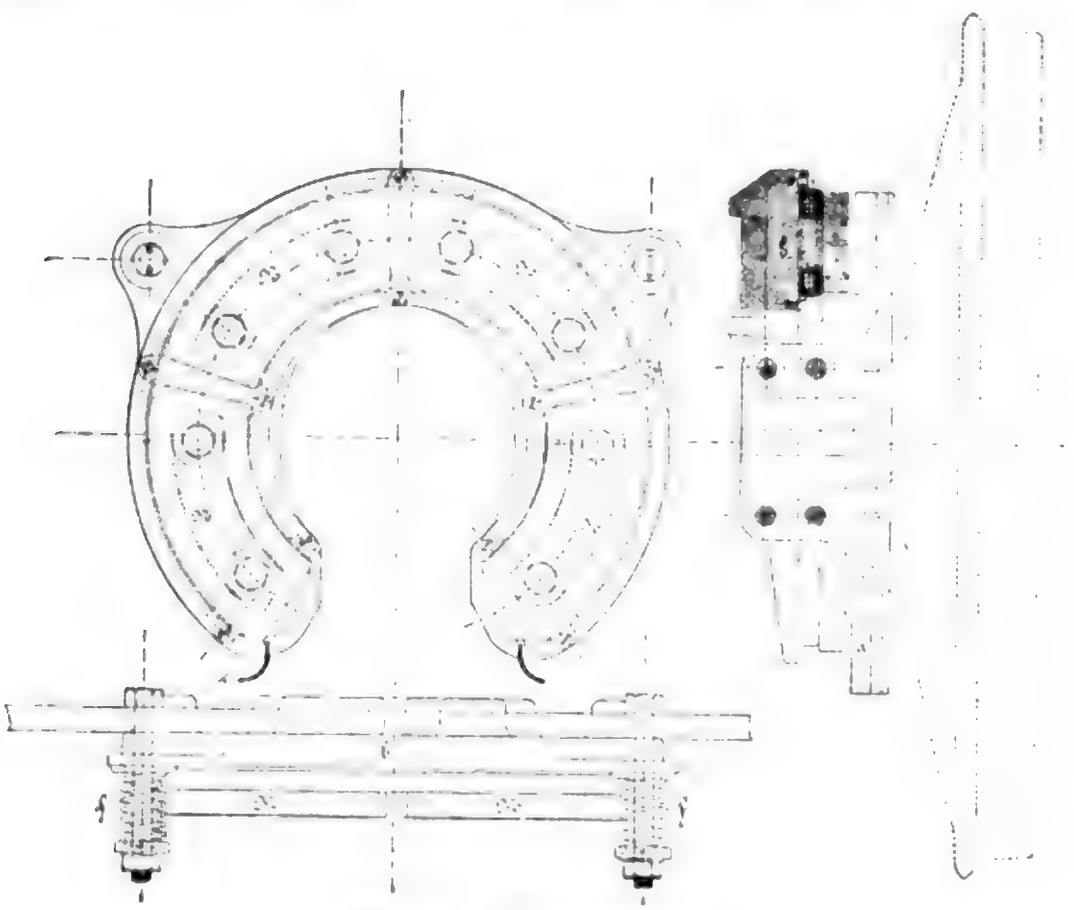


Fig. 94 a. Magnetbremse.

magnete dient, durch magnetische Reibung an ihrer Drehung behindern.

Die Ausführung dieser elektromagnetischen Bremsen wird im allgemeinen in der Weise angewendet, daß man entweder zwei halbkreisförmige Pole bildet, die symmetrisch zur Wagenachse angeordnet sind, oder indem man vier Pole mit wechselnder Polarität in Hufeisenform (Fig. 94 a) herstellt.

Die Elektromagnete sind gewöhnlich an den Achsbuchsen derartig befestigt, daß sie sich nicht

Digitized by Google

drehen, wohl aber in Richtung der Wagenachsen um einige Zentimeter verschieben können. Sobald durch den elektrischen Strom die Pole magnetisch werden, nähern sie sich der Bremsscheibe allmählich und wirken bereits hemmend auf die Drehung der Wagenachse, bis sie schließlich die Bremsscheibe mit ihren eisernen Polflächen berühren und hierdurch gleichzeitig mechanische und magnetische Reibung veranlassen und so äußerst kräftig bremsend auf die Bewegung des Wagens wirken.

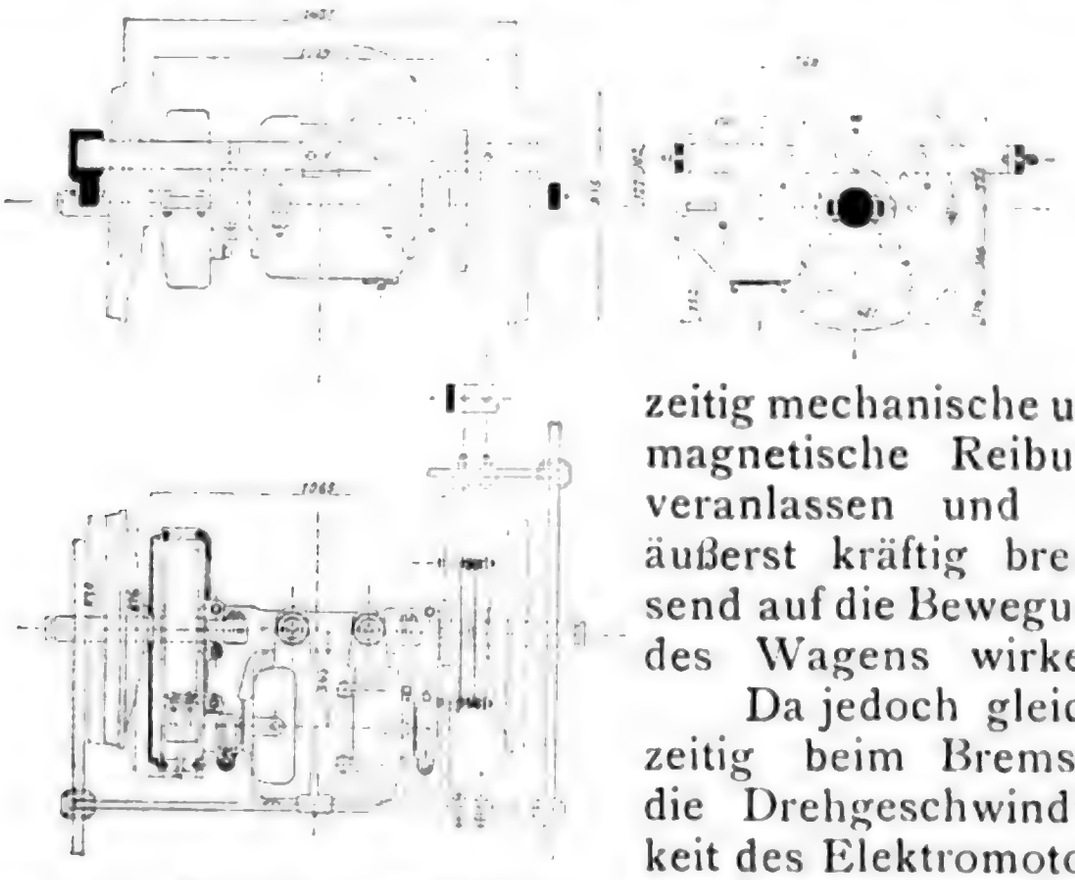


Fig. 94 b c. Magnetbremse (Befestigung).

Da jedoch gleichzeitig beim Bremsen die Drehgeschwindigkeit des Elektromotors sich vermindert, so arbeitet eine derartige Bremse absatz- und stoßweise, und ihre Wirkung hört in dem Augenblick auf oder läßt bedeutend nach, sobald der Wagen fast zum Stehen gekommen ist. Es sind infolgedessen zum völligen Anhalten die bisherigen Handbremsen nicht zu entbehren.*)

Anderseits bietet eine derartige Bremse insofern einen großen Vorzug, als man einfach durch biegsame

*) S. E. T. Z. Heft 14, 1898 vom 7. April: Die elektromagnetische Bremse der Union Elektr.-Gesellschaft von Kubierschky.

Digitized by Google

Leitungen die sämtlichen Wagen eines Zuges verbinden und auf sämtlichen Achsen aller Wagen oder mindestens auf einer Achse eines jeden Wagens zwei derartige elektromagnetische Bremsen zu beiden Seiten der Achse anbringen kann. Es wird hierdurch beim Betriebe mit einem Motorwagen und einem oder mehreren Anhängewagen eine sehr wirksame Bremsung erzielt, die lediglich von einem Mann, der als Wagenführer vorn steht, bewirkt wird, während man früher

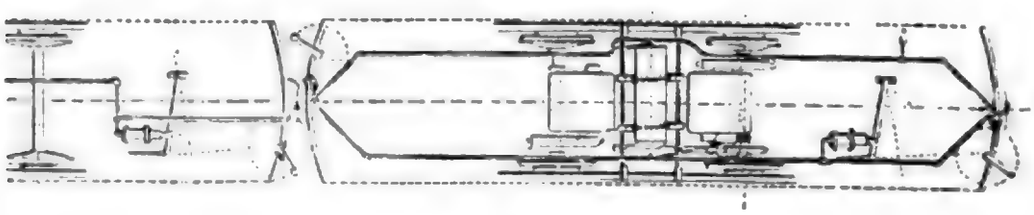


Fig. 95a. Luftbremse (Grundriß).

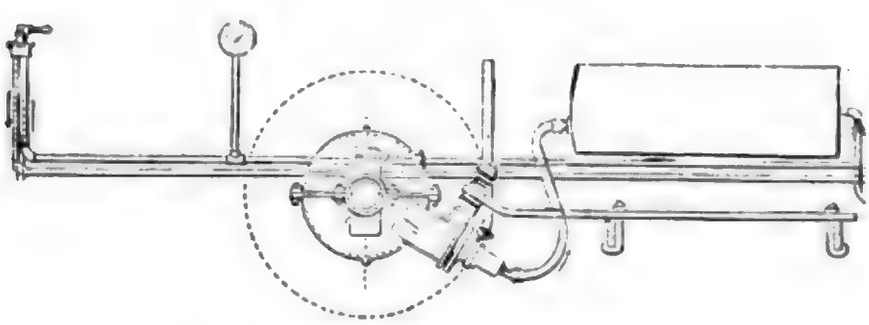


Fig. 95b. Luftbremse (Ansicht).

für jeden Wagen einen Bremser brauchte. Nachdem man jetzt in großen Städten, insbesondere für Untergrund- oder Hochbahnen, 3—4 oder mehr Wagen zu einem Zuge vereinigt hat, und infolgedessen bei größerem Betriebe jeder Wagen mit zwei Motoren ausgerüstet ist, hat man noch ein besonderes durchgehendes Regulier- und Bremssystem konstruiert, bei dem es, wie bereits bei den Fahrschaltern des näheren berichtet wurde, möglich ist, vom Führerstande aus, also am Ende des vordersten Wagens, sämtliche Elektromotoren und auch sämtliche Brem-

Digitized by Google

sen in Tätigkeit zu setzen. Der Erste, welcher ein derartiges System erfunden hat, war der bekannte Ingenieur Franc J. Sprague in Nordamerika, welcher sein durchgehendes Reguliersystem mit dem Namen »Multiple Unit System« bezeichnet hat, wie dasselbe auch versuchsweise bei der Siemensschen Hoch- und Untergrundbahn zu Berlin in Anwendung gekommen ist.*)

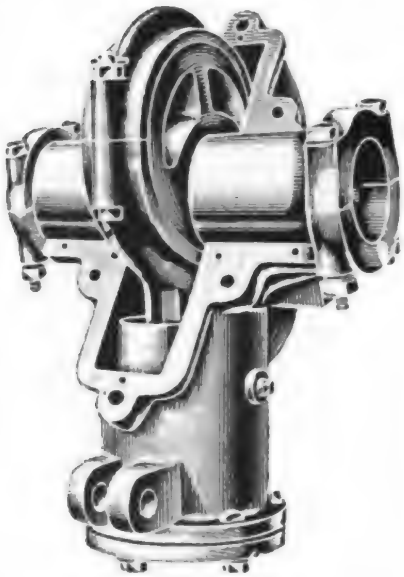


Fig. 95c. Luftpumpe.

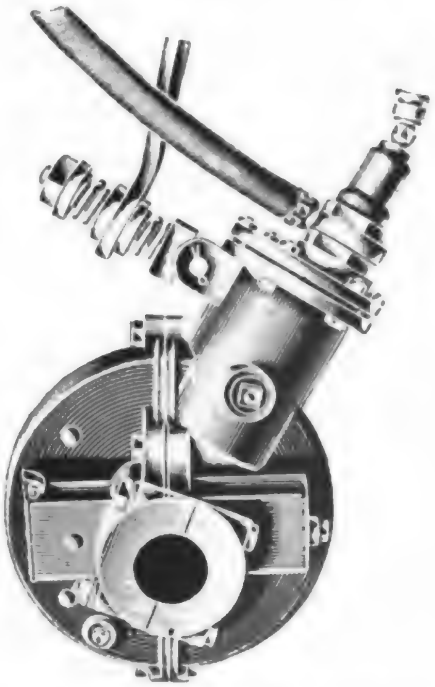


Fig. 95 d. Luftpumpe mit Regulator.

Die Luftdruckbremsen, insbesondere nach dem System Westinghouse, wie sie auf den Vollbahnen seit Jahren in Gebrauch sind, werden vielfach auch bei Straßenbahnen, insbesondere bei großen schweren Wagen oder bei ganzen Zügen angewendet (Fig. 95 a bis 95 d.) Die Erzeugung des hierbei erforderlichen Luftdruckes geschieht entweder durch besondere kleine Elektromotoren, welche die Luft in einem be-

*) S. Elektrot. Mitteilungen 1901, S. 174—177, sowie Street Railway Journal Nr. 5, vom Mai 1901.

Digitized by Google

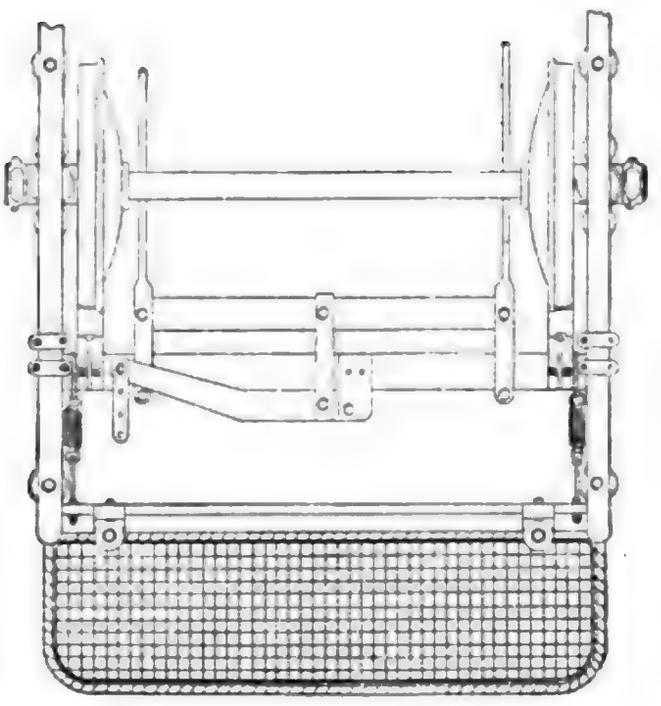


Fig. 96a. Schutzvorrichtung (Draufsicht).

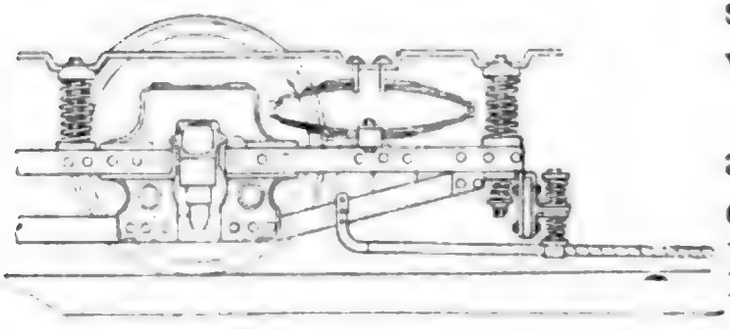


Fig. 96b. Schutzvorrichtung (Seitenansicht).

sonderen Gefäß komprimieren, oder auch durch eine Luftpumpe (Fig. 95 c—d), welche von einer Wagenachse während der Fahrt angetrieben wird, so daß immer der nötige Luftdruck für das jedesmalige Anhalten auf der inzwischen erfolgenden Fahrt erzeugt wird.*)

Die Anwendung der Preßluft für die Betätigung der Bremsen gewährt folgende wichtige Vorzüge:

1. Sie läßt sich außerordentlich leicht erzeugen, da die nötige Luftmenge aus der den Wagen umgebenden Luft entnommen werden kann und geeignete Verdichtungseinrichtungen leicht im Wagen unterzubringen sind. Dabei ist es durch verhältnismäßig einfache Vorrichtungen möglich, die lebendige Kraft des Wagens während der Bremszeit für die Zusammenpressung der Luft nutzbar zu machen.

2. Sie ermöglicht die Aufspeicherung eines sehr großen und lange vorhaltenden Arbeitsvermögens auf verhältnismäßig kleinem Raume.

*) Eingehende Beschreibung und Würdigung von Straßenbahnbremsen bringt die »Zeitschrift für Kleinbahnen« (Julius Springer, Berlin) in Heft 4, 1902, S. 273–278 und im August 1902, S. 489–502, woraus wir obige Beschreibungen und Abbildungen entnommen haben.

Digitized by Google

3. Die so aufgespeicherte Kraft kann leicht überallhin geleitet und für die verschiedenen Zwecke gebraucht werden.

4. Die Preßluft ist ein sehr elastisches Übertragungsmittel, übt daher alle Bewegungen zwar rasch, aber durchaus stoßfrei aus.

Wie angestellte Versuche ergeben haben, wirkt die Luftdruckbremse selbst bei stärkster Wirkung völlig stoßlos und auch geräuschlos, wenn sie richtig aufgebaut ist, und infolgedessen ist sie weder für die Fahrgäste noch für den Straßenverkehr störend und weder dem Fahrzeuge noch dessen einzelnen Teilen nachteilig.*)

Derartige Bremsen bringen einen Zug auf sehr kurze Entfernungen zum Halten und man erzielt die größte Bremswirkung hierbei, welche bei gegebener Geschwindigkeit und dem vorhandenen Wagengewicht überhaupt möglich ist.

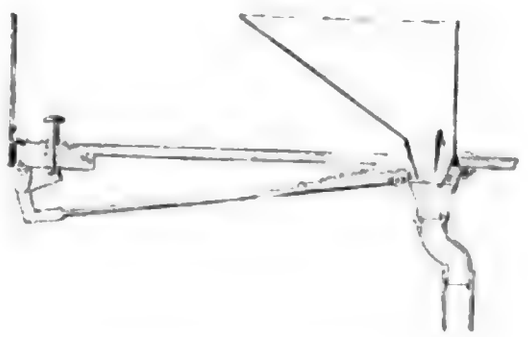


Fig. 97. Sandstreuer.

Ist die Bremse richtig eingestellt, so können die Räder nicht zum Schleifen gebracht werden, weil der höchste Bremsdruck allein von dem durch den Regler eingestellten Luftdruck abhängt, und von der Tätigkeit des Führers in keiner Weise beeinflußt werden kann.

Mit einem Blick kann der Wagenführer an dem vor seinem Stande angebrachten Manometer sich von der Wirksamkeit der Preßluft überzeugen. Die Bremswirkung hängt auch nicht von der augenblicklichen Fahrgeschwindigkeit ab, sondern sie ist bei jeder Geschwindigkeit des Wagens gleich wirksam.

*) Die Firma H. H. Böker & Co. zu Lichterfelde-Ost bei Berlin liefert verschiedene Ausführungen von Luftdruckbremsen.

Außerdem kann die Luftdruckbremse auch für die Anhängewagen gebraucht werden, indem man dieselben durch eine entsprechende Schlauchleitung mit dem Motorwagen verbindet.

Um die Wirksamkeit der Luftdruckbremse auch noch in anderer Weise zu erhöhen, hat man mit derselben nach dem System Reitz einen Luftsandstreuer und eine Schutzvorrichtung (Fig. 96 a b) verbunden. Einen Handsandstreuer einfacher Art zeigt Fig. 97.

Digitized by Google

4. Das Kraftwerk.

Die Stromerzeugungsanlage, welche zur Lieferung der elektrischen Triebkraft dient, besteht aus irgendwelchen geeigneten Triebmaschinen, als Dampfmaschinen, Gasmaschinen oder Wasserräder, welche so hergerichtet sind, daß sie die stromerzeugende Dynamomaschine in der gehörigen Weise umdrehen. In den allermeisten Fällen benützt man für diese Zwecke Dampfmaschinen, für welche der erforderliche Dampf in besonderer Kesselanlage erzeugt wird. Mit wenigen Ausnahmen sind Gasmaschinen bis jetzt noch kaum für diese Zwecke gebraucht worden und Wasserräder, wie insbesondere vertikale Turbinen oder Pelltonräder als horizontale Turbinen können nur da zur Anwendung kommen, wo reichliche Wasserkraft und genügendes Gefälle vorhanden ist. Derartige Anlagen findet man in der Schweiz, Schweden-Norwegen, Italien und einem Teil von Nordamerika; in Österreich und in Deutschland sind Wasserkräfte für diese Zwecke bisher nur in geringem Umfange nutzbar gemacht worden.

Als Betriebsstrom für die Motorwagen dient hauptsächlich Gleichstrom von 500 Volt, in Ausnahmefällen wohl auch von 6—700 Volt Spannung. Drehstrom ist zum direkten Antrieb der Motorwagen bisher nur in wenigen Fällen zur Anwendung gekommen. Sowohl die Dampfmaschinen, als auch die Stromerzeuger müssen nach etwas abweichenderen Prinzipien

hergerichtet werden, als man sie für Lichtbetrieb benötigt; und wo es angängig ist, pflegt man auch nicht, wie bei Beleuchtungsanlagen, Wasserröhrenkessel, sondern große Wasserraumkessel zu verwenden.

Diese Abweichungen liegen lediglich in den ganz anderen Betriebsverhältnissen, als wie sie bei Beleuchtungsanlagen obwalten. Ein größerer Straßenbahn-

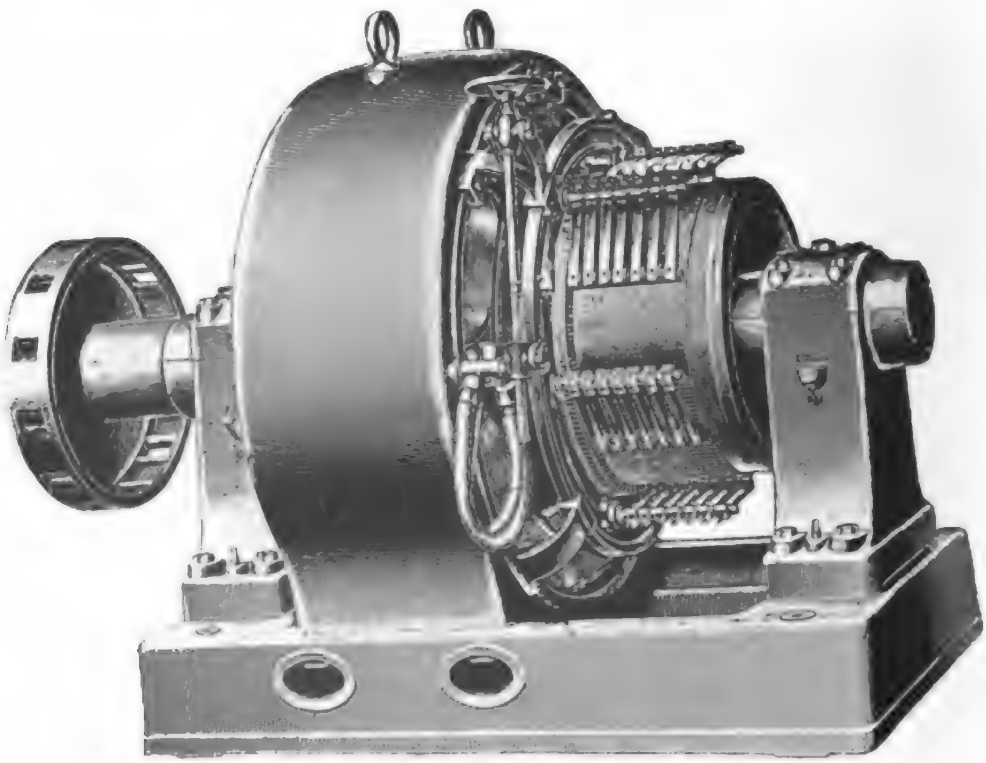


Fig. 98. Dynamo für Kuppelung.

betrieb muß während der ganzen Betriebszeit von 16 bis 20 Stunden täglich eine große Anzahl Motorwagen in Betrieb halten und hat also in dieser Beziehung eine gewisse konstante Belastung, die nur zu gewissen Tagesstunden bei regerem Verkehr anwächst und abschwillt.

Bei Beleuchtungsanlagen dagegen drängen sich die Betriebsstunden mit bedeutenderer Belastung nur

Digitized by Google

auf die Abendzeit und wenige Stunden zusammen, während am Tage regelmäßig wenig Licht gebraucht wird und nur stationäre Motoren Kraftlieferung verlangen. Außerdem treten bei Störungen oder Stockungen im Betriebe auf der Straße auch plötzliche Schwankungen ein, die außerdem auch stets bei jedem Wagen beim Anfahren und Anhalten vorhanden sind. Die Maschinen müssen also geeignet sein, diese Stöße mit Leichtigkeit zu überwinden, wie man sie bei Beleuchtungsanlagen überhaupt nicht kennt. Infolgedessen pflegt man die Dynamos al Compounddynamos mit Übercompoundierung herzurichten, bei der die Wickelung der Feldmagnete so eingerichtet ist, daß sie bei der höchsten Belastung die Spannung etwas erhöhen, so daß, wenn die Umdrehungszahl infolge der höheren Belastung etwas geringer wird, die Spannung immerhin nicht sinkt.

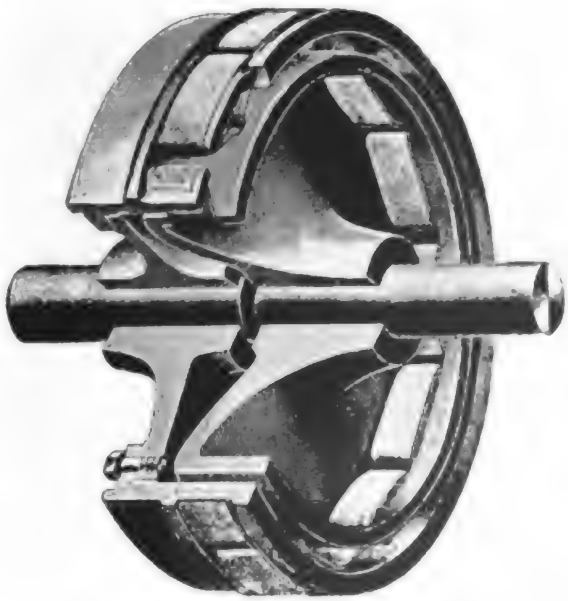


Fig. 99. Kuppelung für Dynamos.

Während man für kleinere und mittlere Betriebe vielfach besondere Maschinen in kleineren Sätzen von 150 bis etwa 500 P. S. gebraucht, pflegt man bei großen Anlagen von einigen 1000 P. S. und höher die Einrichtung so zu treffen, daß dieselben Maschinen abwechselnd je nach Bedarf für Licht oder Kraft arbeiten können (s. a. Abschnitt über Kraftbedarf). Dies wird dadurch erreicht, daß man zwei Maschinen von je

Digitized by Google

Eine Dynamomaschine zum Bahnbetrieb für direkte Kuppelung für 75—250 Kilowatt Leistung nach der Konstruktion von Siemens & Halske ist in der Fig. 98 abgebildet. Man verwendet vielfach statt der früher gebrauchten starren Kuppelung die biegsame Kuppelung nach der Konstruktion von Zodel-Voith (Fig. 99). Eine größere Maschine für 350—1630 Kilowatt derselben Fabrik, jedoch zum Zusammenbauen mit der Dampfmaschine, zeigt Fig. 100.

Die Anforderungen, welche man an die Dampfmaschinen gestellt hat, und insbesondere heute bei Drehstrom- und Wechselstrommaschine in noch höherem Maße stellen muß, haben dazu geführt, schließlich sogenannte Schwungraddynamos zu bauen, bei welchen die induzierenden Feldmagnete mit ihren Spulen als einzelne Polhörner mitten auf einem großen und starken Schwungrad montiert sind. Besonders auch für Drehstrom ist diese Bauart in Gebrauch. Die Anforderungen, welche man an die Gleichförmigkeit der Umdrehungen von Dampfmaschinen im allgemeinen zu stellen hat, und die Mittel, welche man zur Erreichung dieses Zweckes anwendet, hat A. Marshall-Downie eingehend behandelt, worüber später ausführliche Angaben gemacht sind.

Welch ungeheure Abmessungen man heutzutage den Bahngeneratoren gibt, zeigt die Abbildung eines Magnetkranzes (Fig. 101) für die Feldmagnete einer 2700 Kilowatt Dynamo von Westinghouse.

Bei der Vielseitigkeit der Anforderungen und den mannigfachen Mitteln, welche man zur Erreichung des Zweckes anwendet, ist es nicht möglich, in einem Werke geringerer Ausdehnung all diese Einrichtungen zu besprechen. Wir wollen jedoch, um ein Bild der größten Elektrizitätswerke, welche bisher in Europa gebaut wurden, zu geben, die elektrische Zentralanlage zu Berlin am Schiffbauerdamm, beziehungsweise

Digitized by Google

der Luisenstraße nachstehend beschreiben und abbilden.

Die beiden Anlagen, welche zwar in zwei verschiedenen Straßen gelegen sind, stehen durch einen Hof in Verbindung und arbeiten auf ein gemeinsames Leitungsnetz. Es sind große vertikale Dampfmaschinen aufgestellt, von denen jede bis zu 3000 P. S. leisten kann. Die Anordnung des Gebäudes mit dem 76 *m* hohen Schornstein, die Kessel und Dampfmaschinen ersieht man aus dem Schnitt der Zentrale Luisenstraße, Fig. 102. Die Dynamomaschinen, welche sowohl für Licht

Fig. 102. Schnitt durch großes Kraftwerk.

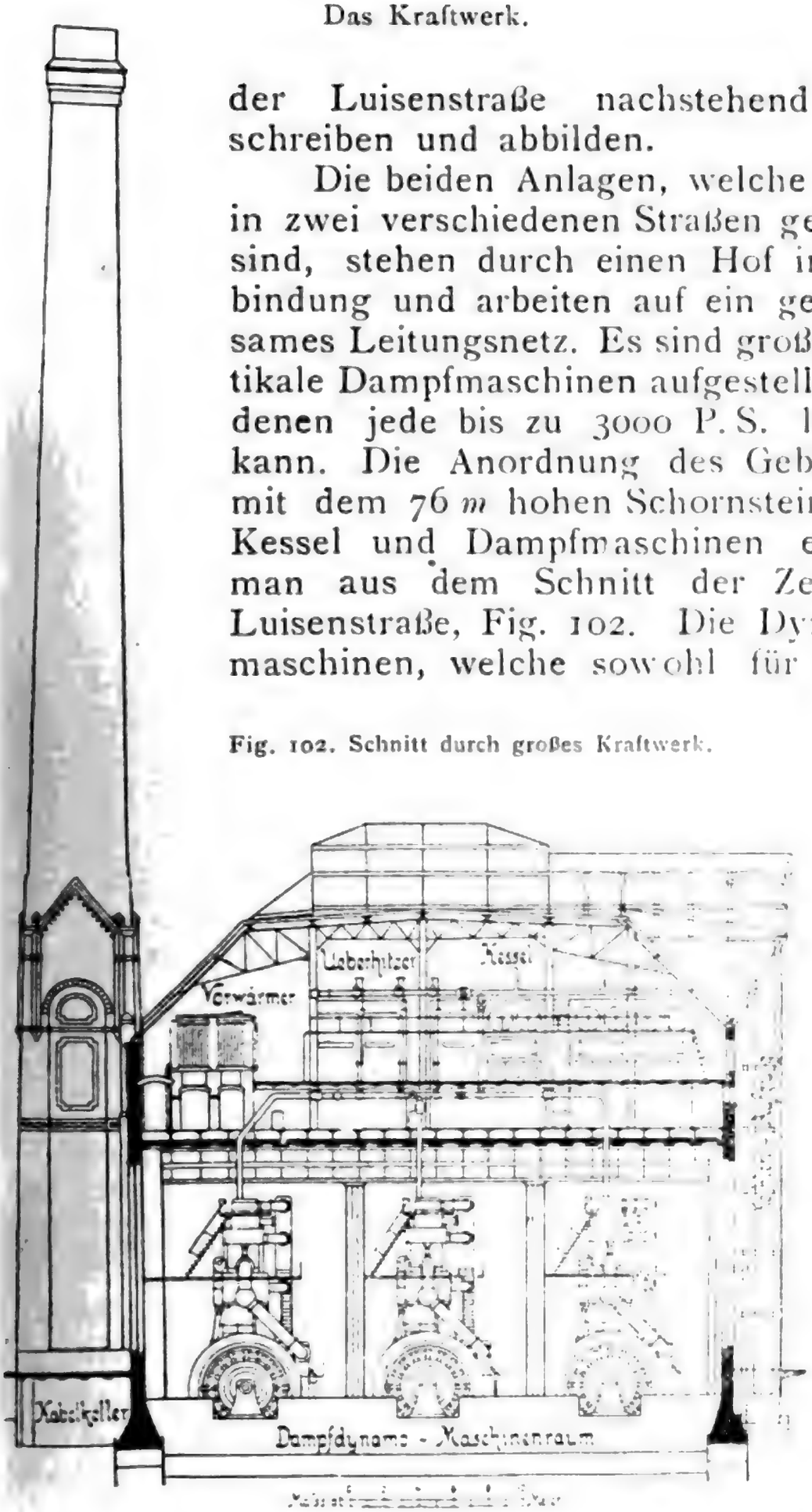


Figure 2.2 Ancient Egyptian hieroglyphics. Egyptian hieroglyphics dating from about 1500 BC. Each symbol represents a word or a sound. Hieroglyphics were used mainly on monuments.

Figure 2.3 Ancient Egyptian cursive writing. Cursive writing from the Ebers papyrus, circa 1550 BC. Cursive writing was used for religious, literary, scientific and business documents.

so daß Verluste an Kondenswasser an den Rohrleitungen und den Zylindern fast vollkommen vermieden

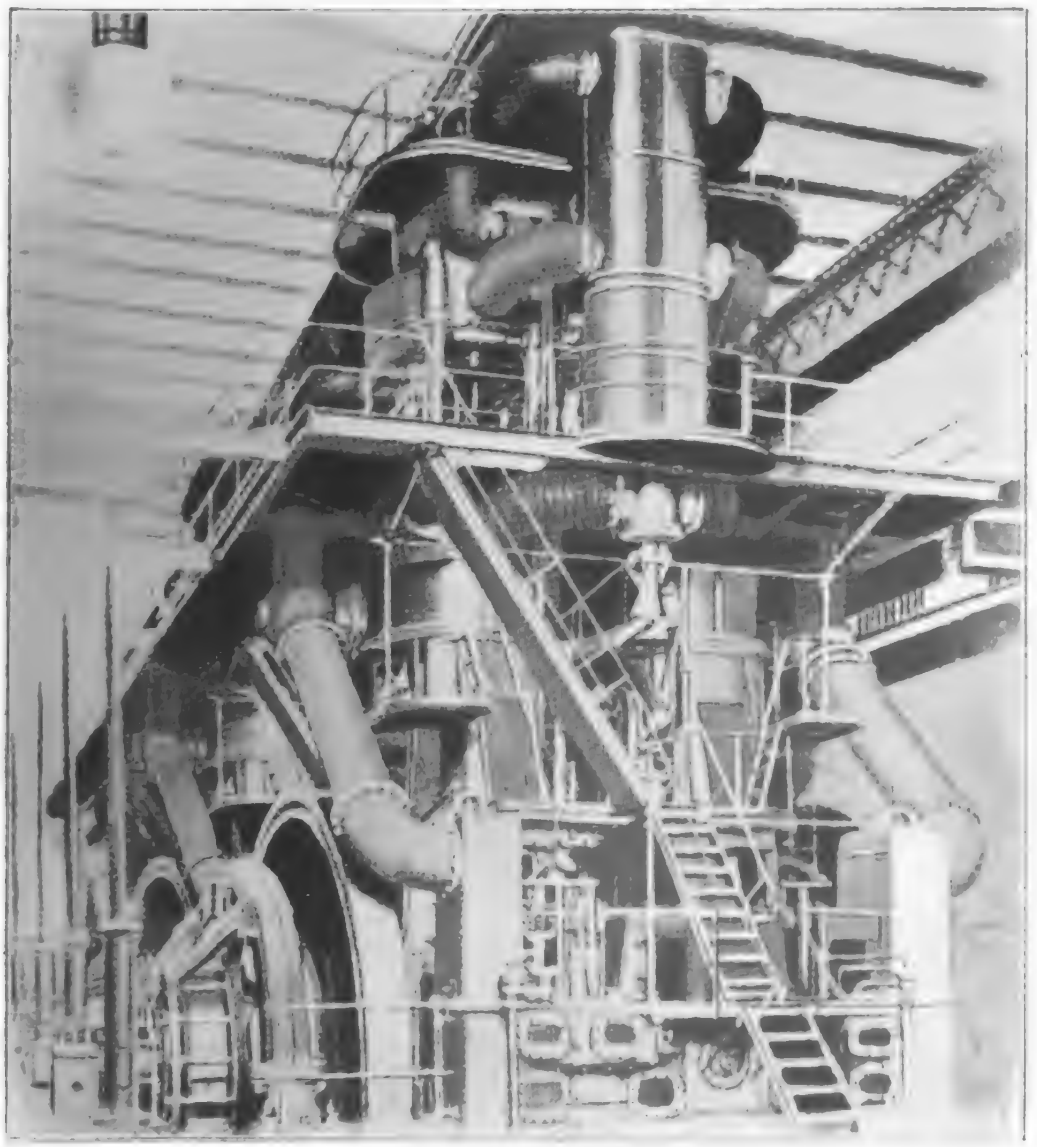


Fig. 104. Dampfdynamo, Luisenstraße, Berlin.

sind und die denkbar günstigste Ausnutzung des Heizwertes der verfeuerten Kohle erzielt wird. Man erreicht für eine indizierte P. S.-Stunde während des Normalbetriebes nur 4·3 *kg* Dampf bei 0·6 *kg* Kohle,

in einer Stunde etwa 1000 m^3 Wasser der Spree entnommen, und nach Gebrauch in einem Klärbrunnen gereinigt und dem Fluß wieder zugeführt. Die große Rohrleitung für diese Zwecke zeigt Fig. 109. Einen Begriff von den zahlreichen Kabeln, welche dieser kolossalen Anlage dienen, gibt der Kabelkeller Fig. 110 mit der Kabelschalttafel Fig. 111. Die Zusatzmaschinen für den Bahnbetrieb sind in Fig. 112 dargestellt.

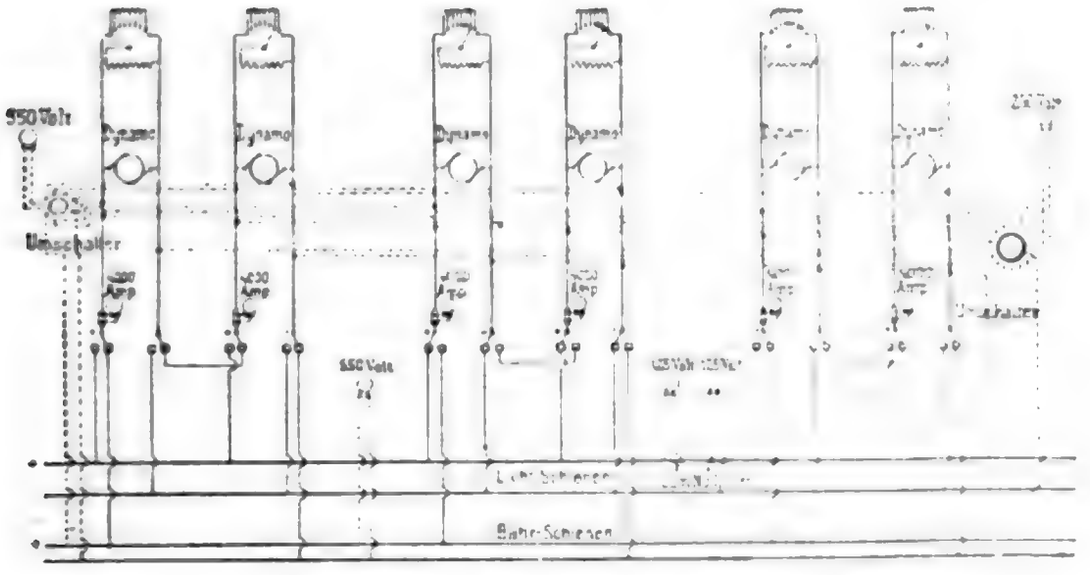


Fig. 106. Schaltungsschema.

Man hat neuerdings bei andern größeren Elektrizitätswerken noch verschiedene Vorkehrungen getroffen, welche dahin zielen, entweder das Wasser zu reinigen oder zu kühlen, oder anderseits gleichmäßige Feuerung und beste Ausnutzung der Kohle zu erreichen. So zeigt Fig. 113 z. B. eine selbsttätige Feuerung englischer Konstruktion, bei welcher die Kohle durch ein selbsttätiges Schaufelwerk, das regulierbar ist, aus Trichtern auf den Rost befördert wird, während gleichzeitig nach Bedarf vorgewärmte Luft in das Feuer geblasen werden kann. Man erzielt auf diese Weise eine denkbar beste Ausnützung der Kohle sowohl als auch ein gleichmäßiges Dampf-

Digitized by Google

halten, wie es von Hand kaum erreicht werden kann. Die Einrichtung ist in weitestgehendem Maße regulierbar. und man kann die Aufmerksamkeit des Heizers bezüglich dieser Regulierung durch einen Registrierapparat kontrollieren, welcher den Zustand der Heizgase, den Gehalt an Kohlensäure, Kohlenoxyd, beziehungsweise atmosphärischer Luft fortlaufend graphisch registriert.

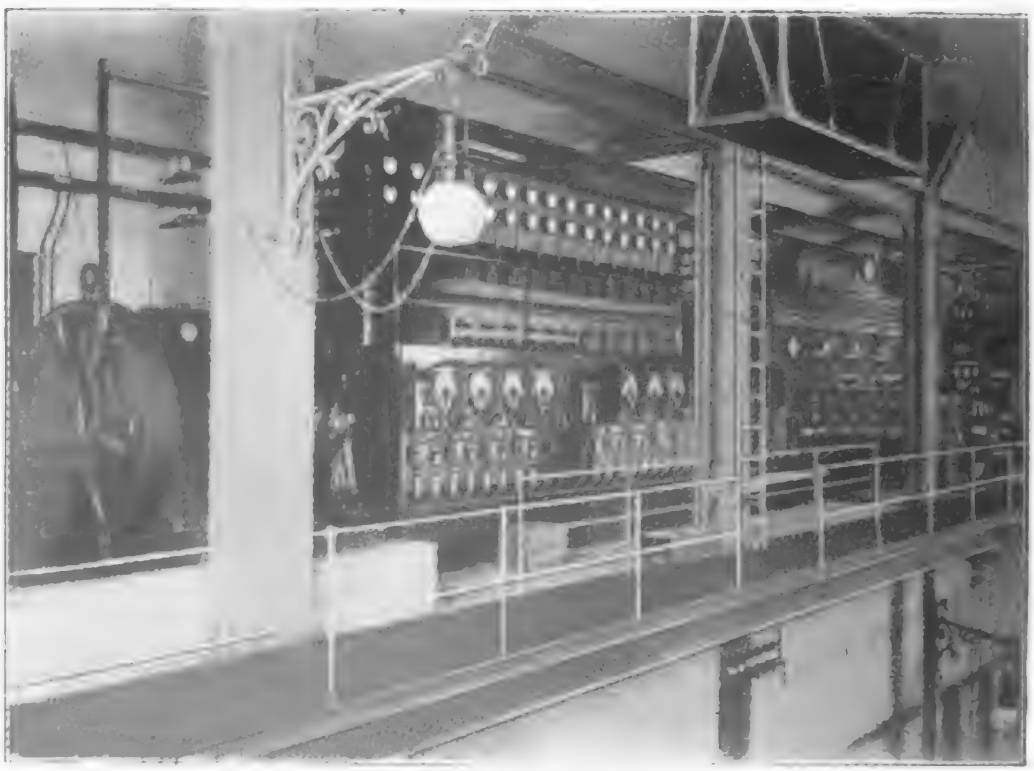


Fig. 107. Hauptschalttafel.

An Plätzen, wo man mit dem Wasser sparsam umgehen muß, hat man vielfach Kühlvorrichtungen angebracht, wie z. B. nach der Konstruktion von Balcke, Fig. 114, oder nach den Einrichtungen von Worthington, Fig. 115. Die dargestellte Anlage befindet sich auf dem Dach des Maschinenhauses und wird durch Ventilatoren noch besonders kühlende Luft eingeblasen, während das heiße Wasser von

oben in einem Gradierwerk herabrieselt, und so in doppelter Weise gekühlt wird.

In Anlagen, wo keine selbsttätige Feuerung vorhanden ist, und es auch an Platz mangelt, einen größeren Kohlenvorrat vor den Kesseln zu lagern, braucht man vielfach die in Fig. 116 dargestellte

Fig. 108. Kesselhaus.

Kohlenkarre, die nach Bedarf auch über eine Kontrollwage (Fig. 117) fährt, so daß die verbrauchte Kohlenmenge genau festgestellt werden kann.

In großen Anlagen pflegt man neuerdings vollständig mechanische Zuführung der Kohle von dem Lagerplatz, oder aus dem Schiff oder Waggon bis unter die Feuerung anzuwenden und ebenso auch durch maschinelle Einrichtung die Asche unter den

Rosten zu entfernen und wenn möglich, auf Kähnen fortzuschaffen.

Anforderungen des elektrischen Betriebes an die Dampfmaschinen.*)

Zufolge der hin- und hergehenden Bewegung der Dampfkolben, welche in rotierende Bewegung umgesetzt wird, findet gleichzeitig mit dem Wechsel der Wirkung entsprechende Beschleunigung in positivem oder negativem Sinne statt, und zwar unabhängig von der Gleichförmigkeit der hin- und hergehenden Bewegung. Des weiteren wechselt überall da wo Kraft gebraucht wird, auch die Höhe ihres Bedarfes, es treten also Schwankungen dabei auf. Um eine solche Anlage so wirksam als möglich zu gestalten, muß man die Krafterzeugung dem Bedarfe möglichst anpassen.

Beim Entwurf von Einrichtungen, welche zur Umwandlung der mechanischen in elektrische Arbeit dienen, ist die Gleichförmigkeit der Umdrehungsgeschwindigkeit eine Lebensfrage und Erfüllung der oben erwähnten Bedingungen dahin zusammenzufassen, daß das Geschwindigkeitsverhältnis so gleichbleibend als nur möglich erhalten werden muß. Nachstehende Ausführungen sind daher für Entwurf und Anwendung der Schwungräder für langsam laufende Maschinen zum Betriebe von Beleuchtungsanlagen und Fahrbetrieb von Wichtigkeit.

Bei Maschinen für Licht- oder Krafterzeugung durch Elektrizität (Stromerzeugungsanlagen) ist die Regulierung der Geschwindigkeit gewöhnlich größer und wichtiger als für irgend einen anderen Zweck, auch sind die Schwankungen der Belastung größer

*) Nach einem Vortrage von A. Marshall Downie im Institute of Engineers and Shippbuilders in Scotland 29. Oktober 1901. — Street Railway Journal Bd. XIX, vom Jänner 1902, S. 72—75.

Digitized by Google

Figure 1: Left: Sir Ronald A. Fisher (1890 - 1962) was a British statistician and biologist who invented many important ideas in classical statistics. He had a prodigious influence on science, and is widely considered one of the founders of modern statistical science. Right: Sir Arthur Lee Samuel (1901 - 1990) was an American pioneer in the field of computer gaming and artificial intelligence. He popularized the term "machine learning" in 1959.

nicht zu weit treiben, weil sonst Pendeln der Maschine eintritt, das bei Nebeneinanderschaltung der Dynamos gefährlich werden kann. Es sollen hier jedoch nur die Verhältnisse bezüglich des Schwungrades betrachtet werden.

Bei hin- und hergehenden Dampfmaschinen vollzieht sich eine Umdrehung (hier bei unserer Erör-

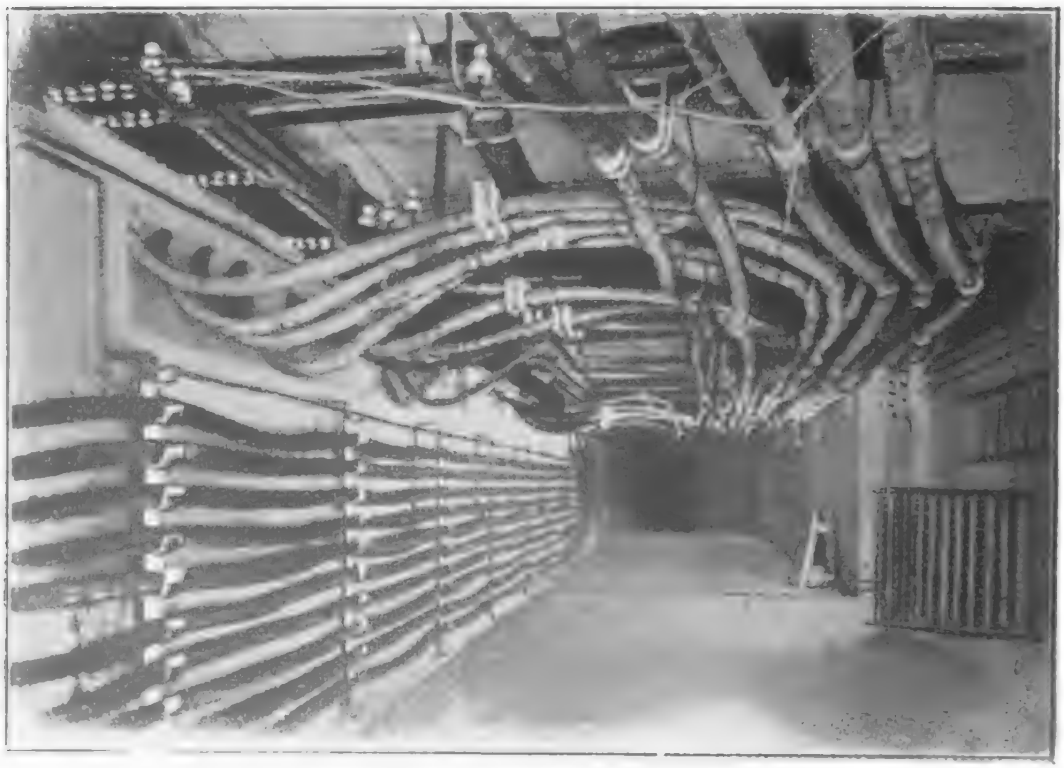


Fig. 110. Kabelkeller.

terung wenigstens) in zwei Kolbenhüben oder einer Umdrehung der Kurbel. Der Druck auf den Kolben wechselt in dieser Zeit von einem Höchstbetrage bei der Dampfeinströmung bis zu einem Mindestbetrage bei der Dampfausströmung und beim Rückgang des Kolbens auf der entgegengesetzten Seite von einem Höchst- zu einem Mindestbetrage. Zur selben Zeit wirkt entsprechend in tangentialer Richtung zum

Kurbelkreise eine entsprechende Kraft. Die Wirkung auf die Kurbel (Kurbeleffekt) ist jedoch begrenzt durch die Länge der Schubstange und die Trägheit der entsprechenden umlaufenden Teile der Maschine. Die Wirkung der begrenzten Schubstange besteht darin, den Höchstbetrag an Kraft auf die Kurbel zu über-

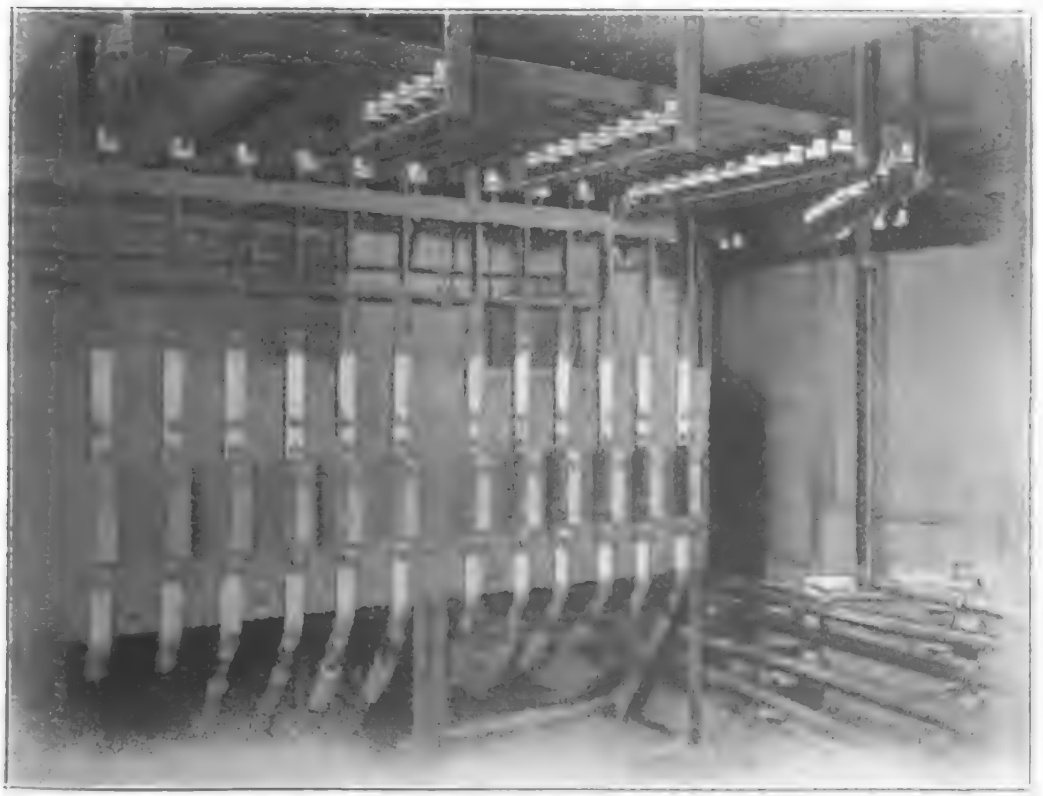


Fig. 111. Kabelschalttafel.

tragen und zwar an einem Punkte ihres Umdrehungskreises der näher dem inneren toten Punkt gelegen ist als bei einer unbegrenzt langen Schubstange. Der Wechsel der Wirkung ist infolgedessen schneller und ungleichförmiger während eines Umlaufes. Wenn auch bei großen Maschinen die Umdrehungen in gewisser Zeit gering sind, so ist doch das Beharrungsvermögen der bewegten Teile bei deren großem

Digitized by Google

Ford
Ford
Ford

Ist E die gesamte in einem Schwungrad vom Gewicht W aufgespeicherte Energie (die man als am Ende des Radius der Kreisbewegung befindlich annimmt), welche sich mit einer mittleren Umfangsgeschwindigkeit V_0 Meter in der Sekunde bewegt; $\triangle E$ die Schwankung der Schwungradenergie oder

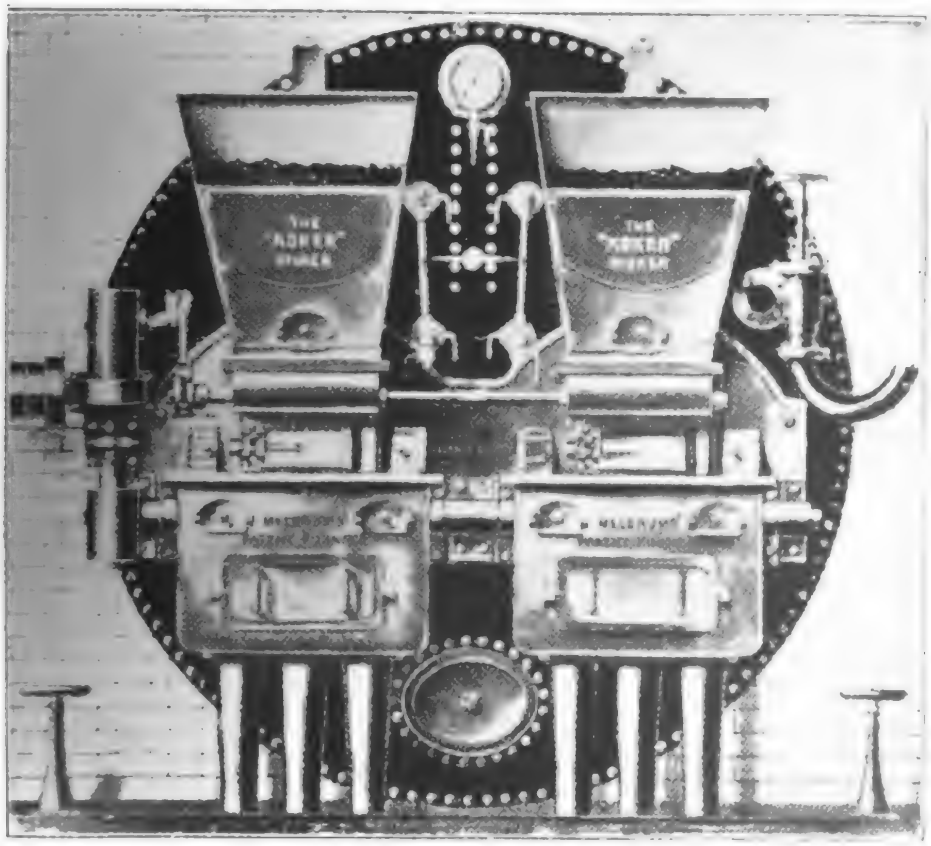


Fig. 113. Selbsttätige Feuerung.

im Schwungrad aufgespeicherten Energie beim Wechsel von der geringsten Geschwindigkeit V_1 durch V_0 zur Höchstgeschwindigkeit V_2; w die in einer Umdrehung der Maschine geleistete Arbeit und q der Wert der zulässigen Geschwindigkeitsschwankung zwischen der höchsten und kleinsten Geschwindigkeit, k der Koeffizient der Energieschwankungen, so ist

Digitized by Google

$$q = \frac{V_2 - V_1}{V_0},$$

$$E = \frac{W}{2g} \frac{V_0^2}{},$$

$$\triangle E = \frac{W}{2g} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{W}{2g} (V_2 + V_1) (V_2 - V_1)$$

$$\text{oder} = \frac{W}{g} V_0 (V_2 - V_1) = 2 E q. \quad \text{Da aber}$$

$$\frac{\triangle E}{w} = k, \text{ so ist } k = \frac{2 E q}{w},$$

$$2 E = \frac{k W}{q} \frac{W V_0^2}{g} = \frac{k w}{q}$$

und $\frac{W}{g} = \frac{kw}{q V_0^2}$. Hieraus geht hervor, daß die Maße des Schwungrades im direkten Verhältnis zum Wert der Arbeitsschwankung und den Pferdestärken steht und im umgekehrten Verhältnis zur Änderung der Geschwindigkeit und dem Quadrat der Beschleunigung.

Man würde also an Material sparen, wenn man das Schwungrad mit hoher Umfangsgeschwindigkeit laufen ließe, da jedoch die Größe der Spannung im Material zufolge der Fliehkraft unabhängig vom Querschnitt des Radkranzes ist und sich im Quadrat der Umfangsgeschwindigkeit ändert, so ist die höchst zulässige Geschwindigkeit des Schwungrades durch die Festigkeit des Materials begrenzt, aus dem es hergestellt ist.

Da das Schwungrad meistens aus Gußeisen besteht, so wird die höchst zulässige Zugbeanspruchung des Materials bei einer Höchstgeschwindigkeit im Umfang von 100 Fuß (30·480 *m*) in der Sekunde erreicht, was

Digitized by Google

etwa 80—90 Fuß (24·384—27·432 *m*) in der Sekunde für den mittleren Umfang entspricht. Die höchste Zugkraft zufolge der Fliehkraft ist hierbei etwa 1000 Pfund (453·59 *kg*) auf den engl. Quadratzoll (645·15 mm^2 = 6·4515 cm^2).

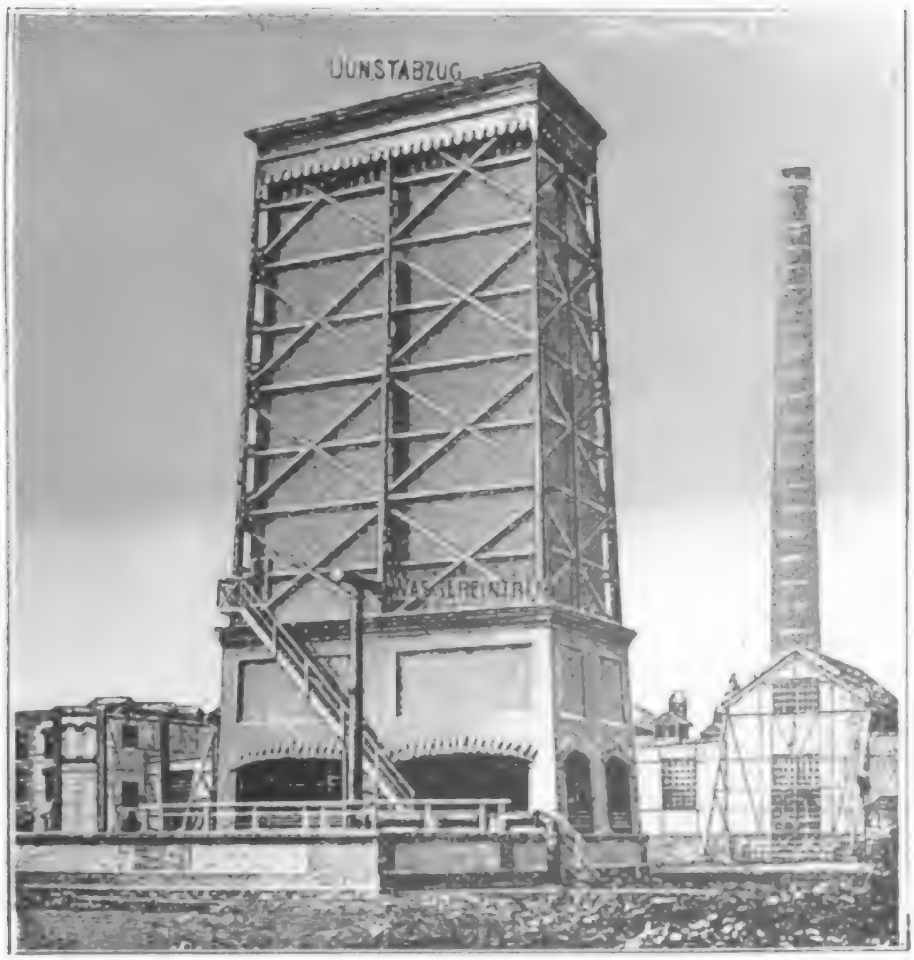


Fig. 114. Kühlturm nach Balike.

Der Ungleichförmigkeitsgrad.

Der Wert des Faktors q hängt von dem Zweck der Dampfmaschine ab, für welchen sie bestimmt ist, und richtet sich wohl auch nach den Erfahrungen der Fabrikanten.

und Schlafräume, Bad und Toilette. Die Fenster sind mit Rolläden versehen. Die Heizung ist eine Warmwasserheizung mit Kohlenfeuerung. Die Kosten betragen 20 000 Mk.

Abb. 5. Ansicht des Hauses Nr. 1 in Berlin-Steglitz, Ringstraße 1.

Das Haus Nr. 1 in Berlin-Steglitz, Ringstraße 1, ist ein Einfamilienhaus mit Mansarde und Souterrain. Es enthält im Souterrain Waschküche, Vorratsräume und Kohlenkeller, im Erdgeschoß Wohnzimmer, Herrenzimmer, Küche und Speisekammer, im Obergeschoß 4 Schlafzimmer und Bad, in der Mansarde 2 Zimmer und Trockenboden. Die Heizung ist eine Warmwasserheizung mit Kohlenfeuerung. Die Kosten betragen 30 000 Mk.

Die Fabrikanten des europäischen Festlandes pflegen keine so große Gleichförmigkeit anzuwenden als diejenigen in England und Amerika. Die amerikanischen Schwungräder für Fahrbetrieb ergeben Werte von q in Höhe von $\frac{1}{450}$ bis $\frac{1}{650}$, und in England verlangte man für eine Wechselstrom-Beleuchtungsanlage einen Gleichförmigkeitsgrad von $\frac{1}{500}$.

Fig. 116. Kohlenkarren.

Der Wert oder das Verhältnis von q wird zuweilen für elektrotechnische Zwecke in »elektrischen Graden« bezüglich der Antriebsschwankungen ausgedrückt, wovon man besonders in Amerika (und zuerst bei der General Electric Company) Gebrauch machte. Beide Ausdrucksweisen sind nur in der Form verschieden, dem Wesen nach jedoch gleichbedeutend, wie wir später sehen werden.

Deutsche Fabrikanten wenden etwa die nachstehenden Verhältnisse an, wie sie in der folgenden Tabelle aufgeführt sind:

Ungleichförmigkeitsgrad.

Für Lichtmaschinen Gleichstrom	$\frac{1}{150}$
Für Licht- und Bahnbetrieb von derselben Maschine	$\frac{1}{200}$

Für Wechselstrom-Dynamos in Nebeneinanderschaltung	$\frac{1}{250}$
Für Wechselstrommaschinen, welche rotierende Umformer und Synchronmotoren speisen	$\frac{1}{300}$

wobei als Ungleichförmigkeitsgrad verstanden ist:

$$\frac{V \text{ max.} - V \text{ min.}}{V \text{ normal.}}$$

Es ist außerdem üblich, bei Bestellung von Dampfmaschinen das GD^2 des Ankers, beziehungsweise des umlaufenden Teiles der elektrischen Maschine anzugeben, wobei G das Gewicht und D der Durchmesser des Ankers ist. Der Fabrikant der Dampfmaschine rechnet sich den Schwungradeffekt, den die Maschine zur Erfüllung der gestellten Bedingung haben muß, aus nach der bekannten Formel der Bewegung $\frac{M\ V^2}{2}$ beziehungsweise $\frac{G\ V^2}{2\,g}$ wobei

$$v = \frac{\text{Umläufe die Minute}}{60} \times D\,\pi.$$

Anstatt des GD^2 gibt man, wie schon erwähnt, auch die »elektrische Winkelabweichung« an, indem man bei Wechselstrommaschinen den Weg einer Periode, von einem Nordpol zum anderen als $360^0 = 1\ \sim$ bezeichnet.

Wird z. B. diese Winkelabweichung $= 6^0$ angegeben, so versteht man darunter zulässige Schwankungen von 3^0 vor, beziehungsweise 3^0 zurück gegen die normale Geschwindigkeit, welche 30 *m* in der Sekunde nicht übersteigen darf. Bei zweizylinderigen doppelt wirkenden Dampfmaschinen hat man

Digitized by Google

$$\frac{360}{4} = 90.$$

$S = \frac{6^0}{90 \times p}$ p = Polpaare der Maschinen. Dies erzielt

z. B. $S = \frac{6}{90 \times 30} = \frac{1}{450}$ bei 60 Polen,

$S = \frac{6}{90 \times 15} = \frac{1}{225}$ bei 30 Polen.

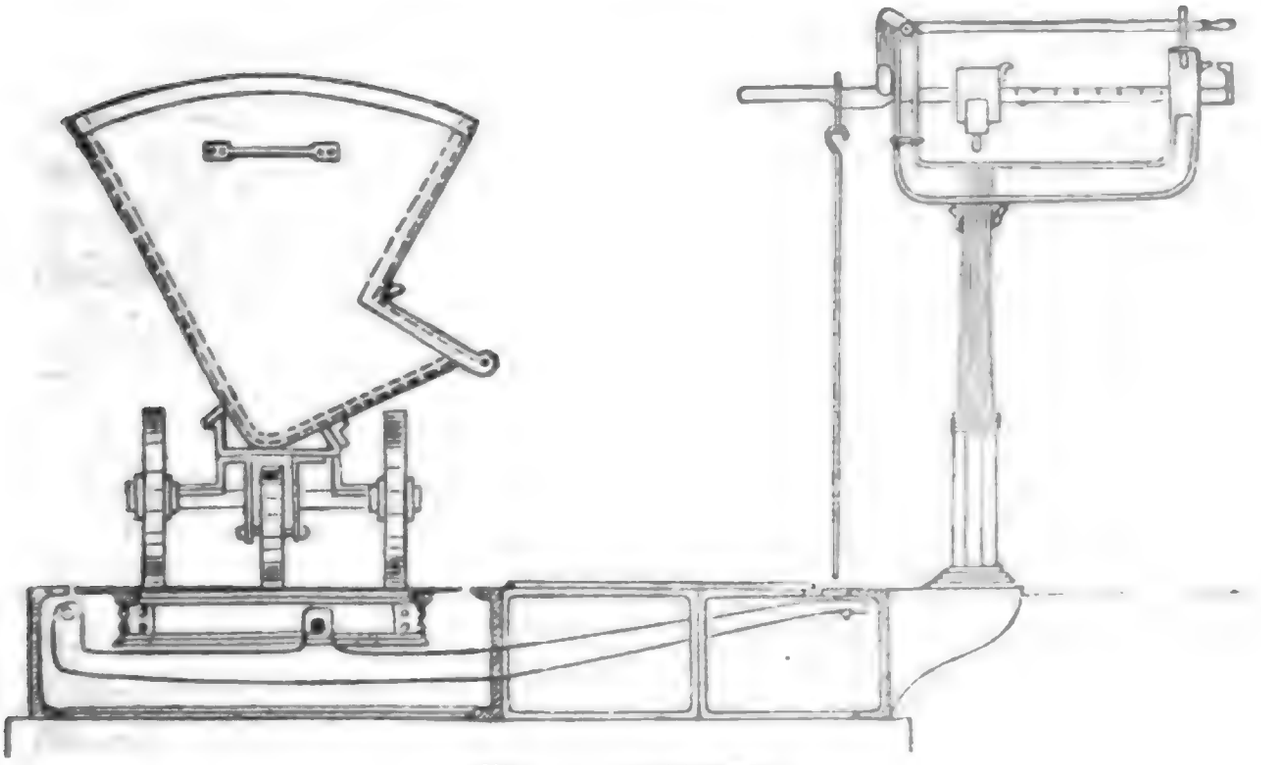


Fig. 117. Kohlenwage.

Diese Rechnungsweise geht aus folgender Überlegung hervor: bezeichnet man $1 \infty = 360^0$ und hat die Maschine p Polpaare, so hat sie in einer Umdrehung $p \times 360$ elektrische Grade und bei einer Compoundmaschine, die viermal in einem Umlauf angetrieben wird, ist die Anzahl der Impulse eines Umlaufes $\frac{p \times 360}{4}$ Bezeichnet man die zulässigen Schwankungen mit 4^0, so ist $S = \frac{4}{90 \times p}$, was in der zu-

Digitized by Google

vor gegebenen Formel dem q entspricht. Dieser Koëffizient der Energieschwankungen ist wohl der wichtigste Faktor bei der Berechnung der Schwungräder und am schwersten zu bestimmen. Es ist daher äußerst wichtig, daß man Kurbeleffektdiagramme für diese Zwecke konstruiert.

Deutsche Fabriken geben aus den zuvor angegebenen Gründen (bezüglich Länge der Schubstange) vielfach den Kurbelwellen von Zweizylinder-Maschinen nicht 90^0, sondern 108^0 Abstand im Kreise, um eben eine gleichförmigere Wirkung zu erzielen.

Es lassen sich aus obigen Erwägungen und praktischen Erfahrungen folgende Hauptpunkte für Schwungräder aufstellen:

1. Die mittlere Energie eines Schwungrades soll sein für eine elektrische Pferdestärke bei

Lichtmaschinen $0{\cdot}88\,m$ ton,

Bahnmaschinen $1{\cdot}22\,m$ ton.

2. Gegossene Schwungräder sollen möglichst massiven Kranz haben; sind sie zusammengesetzt, so ist die Gelenkkettenform die beste, demnächst die Zusammensetzung mit Feder- und Nutplatten mit Schwalbenschwanz. Flanschen- und Bolzenverbindungen sollten vermieden werden; die Verbindungen sollen möglichst nahe einer Speiche sich befinden.

3. Die Umfangsgeschwindigkeit gegossener Schwungräder soll mit 12facher Sicherheit berechnet sein und 30 *m* in einer Sekunde nicht überschreiten, dasselbe gilt für Gelenkkettenräder mit 8facher Sicherheit; darunter sollte man überhaupt nicht gehen; nur bei Stahlrädern kann man 39 *m* per Sekunde zulassen; andere Räder sollen nur 21—24 *m* Umfangsgeschwindigkeit erhalten.

4. Die Speichen sollen mit starken Ansätzen am Ende mit dem Kranz verbunden und in der Nabe gut eingepaßt sein.

Digitized by Google

5. Bestes, homogenes Material ist allein zu verwenden und sind Probestücke desselben zu prüfen.[1])

Pufferbatterien.

Eine wertvolle Ergänzung der Kraftanlagen für Gleichstrombetrieb bilden die Pufferbatterien. Sie dienen sowohl zur Mithilfe bei zeitweiser starker Belastung, wie auch als Momentreserve bei Unfällen und als Stromerzeuger für schwachen Verkehr in späten Nachtstunden.

Die Größe der Zellen richtet sich nach der für den Betrieb erforderlichen Gesamtstromstärke.[2]) Da die Batterien mit den Dynamos nebeneinander geschaltet sind, so müssen sie bei Schwankungen im Betriebe, bezw. der Stromstärke 10—25% der Kraft abgeben oder aufnehmen können. Sie wirken hierbei so stark und ausgleichend, daß die Spannung im Krafthause kaum um 2% schwankt. Hierdurch werden naturgemäß auch die Triebmaschinen geschont und ein gleichmäßiger ruhiger Betrieb im Werk wie auf der Strecke erzielt.

---

[1]) S. a. »Zeitschr. d. Ver. d. Ingenieure« 1902, Heft 6 und 9: »Die Berliner Elektrizitätswerke« von L. Datterer.

[2]) S. Joh. Zacharias: »Die Akkumulatoren.« Jena 1901. S. 618 und 684.

Digitized by Google

5. Entwurf und Ausführung von Straßenbahnen.

Projektieren.

Wenn es sich darum handelt, die Unterlagen für das Projekt einer Straßenbahn zu schaffen, so hat man folgende Gesichtspunkte in Rücksicht zu ziehen.

I. Beschaffenheit der vorhandenen Straßen.
II. Allgemeine Erörterungen.
III. Schienenmaterial und Geleise.
IV. Kraftanlagen.
V. Das Betriebssystem.
VI. Verkehr, rollendes Material, Beförderungspreise.
VII. Preis der Arbeiten, des Baumaterials, der elektrischen Energie.

Im allgemeinen sind die Kosten nach folgenden Punkten übersichtlich zu ordnen:[1])

I. Bauten.
II. Maschinen und Einrichtungen für das Kraftwerk (Zentrale).
III. Streckenausrüstung.
IV. Rollendes Material.

[1]) Nach »Elektr. Verkehrstechnik« von Joh. Zacharias, Costenoble, Jena.

Digitized by Google

V. Reparaturwerkstatt, Diverses.
VI. Bauleitung, Projektierung, Ingenieurspesen, Reisen, Inbetriebsetzung.
VII. Reserveteile und Unvorhergesehenes.

Die obigen Positionen umfassen etwa die folgenden Gegenstände:

ad 1. Maschinen- und Kesselhaus, Schornstein, Brunnenanlage, Entwässerung, Wagenhalle, Werkstätten mit Revisionshalle, Betriebs- und Verwaltungsgebäude, eventuell auch eine Werkstätte zum Lackieren der Wagen.

ad 2. Krafterzeugungsanlage, gewöhnlich Dampfmaschinen und Dampfkessel, Speisepumpen, Rohrleitungen, Dynamomaschinen, Regulier- und Schaltapparate etc. auf einem Schaltbrett übersichtlich angeordnet. Beleuchtung aller Räume, Diverse elektrische Leitungen.

ad 3. Schienengeleise mit Weichen, elektrische Oberleitung nebst Zubehör für die Stromzuführung.

ad 4. Das rollende Material umfaßt: Motorwagen, Anhängewagen, Ausrüstung der Motorwagen mit Elektromotoren, Fahrschalter etc. und Beleuchtung der Wagen eventuell Zahlkasten.

ad 5. Die Reparaturwerkstätte nebst Revisionsgrube, Elektromotor, Drehbank, Schmiedefeuer nebst Gebläse, sowie verschiedene Werkzeuge.

ad 6. Die für jeden Bau erforderlichen Unkosten beziehen sich hauptsächlich auf die Kosten für die Vorarbeiten, Projektierung nebst Plänen, Zeichnungen und Kostenanschlägen, sowie die Bauleitung durch einen Ingenieur, verschiedene Reisekosten und die Inbetriebsetzung der ganzen Anlagen.

ad 7. Besonders für überseeische Länder ist es notwendig, eine reichliche Anzahl von Reserveteilen

zu veranschlagen, die es ermöglichen, bei eintretenden Schäden den Betrieb durch Auswechseln der defekten Teile sicher aufrecht erhalten zu können. Es sind hierfür etwa 3 Prozent der Anlagekosten einzusetzen.

Da man nicht alle eintretenden Verhältnisse genau berücksichtigen kann, so pflegt man zirka 10 Prozent der Anschlagssumme als Unvorhergesehenes aufzunehmen.

Anforderungen für direkte Stromzuführung.[1])

1. Die Berührung von Teilen, die unter verschiedener Spannung stehen, soll für Menschen und Tiere ausgeschlossen sein.

2. Feuchtigkeit, Wasser oder Schmutz darf nicht zu denjenigen stromführenden Teilen gelangen, welche unter der Fahrbahn für den Motorwagen den Stromschluß bewirken.

3. Stromunterbrechungen während der Fahrt eines Motorwagens dürfen in der Zuführung des elektrischen Stromes nicht eintreten.

4. Irgend welche Funkenbildung an den stromschließenden Teilen soll ausgeschlossen sein.

5. Kurzschluß zwischen Teilen, die unter verschiedener Spannung stehen, soll nicht möglich sein.

6. Verdorbene Teile sollen leicht und schnell ausgewechselt werden können.

7. Die Abnutzung aller Teile, welche der Reibung oder sonstigen veränderlichen Einflüssen ausgesetzt sind, muß möglichst gering sein.

---

[1]) Nach Prof. Woinarowski St. Petersburg dieselben beziehen sich auch auf das Teilleiter- bezw. Knopfsystem, Vortrag von Joh. Zacharias, Glasers Annalen, Bd. 46, Heft 12, 15. Juni 1900. S. 229, woselbst das System Stendsbach beschrieben und abgebildet ist.

Digitized by Google

8. Bei offenen Schlitzkanälen müssen Schmutz, Schnee und aller Unrat leicht und sicher beseitigt werden können.

9. Hindernisse im Schlitz des Kanals sollen während der Fahrt vom Motorwagen entweder beseitigt, oder vermöge der lebendigen Kraft des Wagens übersprungen werden können.

10. Die richtige Funktion der stromschließenden Teile zwischen Motorwagen und Unterleitung soll unter selbsttätiger Kontrolle stehen.

11. Stromverluste sollen nicht größer sein, als auf Linien mit guter Oberleitung.

12. Die Oberfläche zu Tage liegender, stromführender Teile soll selbsttätig vom fahrenden Wagen gereinigt werden.

13. Abirrende Ströme sollen auf in der Nähe befindliche Metallrohre, Kraft- oder Telephonleitungen keine schädigenden Einflüsse haben.

14. Induktionsstörungen im Fernsprechbetriebe sollen kaum wahrnehmbar sein.

15. Die Anlagekosten der Unterleitung sollen denjenigen für Oberleitung nahe kommen.

Vorschriften für Projektunterlagen für elektrische Straßenbahnen.[1])

1. Übersichtsplan in 1 : 10000.

2. Grundriß in 1 : 1000 mit Angabe der Stationen in 100 *m* Abstand, der Kurvenanfangs- und Endpunkte mit Anschrift der Halbmesser; Bezeichnung der Leitungs- und Spanndrahtlage und ihrer Stützpunkte.

---

[1]) Gültig im Königreich Sachsen, aus: »Bau und Betrieb elektrischer Bahnen« von Max Schiemann.

3. Längenprofil im Maßstabe des Grundrisses, die Höhen nach Bedarf, um das 10- oder 20fache vergrößert; also 1 : 1000 für die Längen, und 1 : 100 oder 1 : 50 für die Höhen.

4. Querprofile im Maßstabe von 1 : 100 oder 1 : 50, für die einfacheren Strecken in 100 oder 200 *m* Abstand, im übrigen nach Bedarf, wie es der Zweck, die verschiedenen Lagen der Linie kenntlich zu machen, erfordert.

5. Genaue Darstellung des Oberbaues (Schienen- und Laschenprofil in 1 : 1, Oberbauprofil und Weichenkonstruktion in 1 : 5), sowie der anzuwendenden Gestänge (eventuell Leitungskanäle), Spanndrähte und Leitungen mit Maßangaben.

6. Genaue Darstellung der Betriebsmittel im Maßstabe von mindestens 1 : 15 mit Angabe der Gewichte, maximalen Belastungen und der Leistungsfähigkeit der Motoren, Sonderzeichnung der Bremsvorrichtungen; Schematische Zeichnung der Schaltungen.

7. Darstellungen der zu errichtenden oder mit zu benutzenden Kunst- und Hochbauten im Maßstabe 1 : 100 und der Zentralstationseinrichtung.

8. Eingehender Erläuterungsbericht mit Angabe der in den verschiedenen Anlageteilen vorkommenden elektrischen Größen und Festigkeitsverhältnisse.

9. Kostenanschlag der Anlage.

10. Fahrplanentwurf (graphisch).

Anmerkung: Die Pläne und Zeichnungen sind im Formate von 20×30 *cm* zusammengelegt, die Schriftstücke in Aktenformat, und alle Gegenstände in doppelten Exemplaren vorzulegen.

Digitized by Google

Notwendigste Angaben für vorläufigen Kostenüberschlag.[1])

1. Länge von Strecken in Kilometern.
2. Spurweite in Millimetern (600, 750, 1000 und 1435).
3. Schienensystem, bezw. Profil.
4. Schienengewicht pro Meter.
5 Breite und Stärke der Spurstangen in Millimetern.
6. Abstand der Spurstangen von Mitte zu Mitte.
7. Höchste Neigungen auf 1000 *m* Länge.
8. Kleinster Kurvenradius in Metern, Kurvenlänge.
9. Höchste Steigung in kleinster Kurve, Steigungsverhältnis auf 1000 *m*, Kurvenradius in Metern, Länge der Kurven in Metern.
10. Anzahl der zu betreibenden Wagen, jeder mit Ladung im Gewicht von Kilogramm.
11. Wagengewicht ohne Ladung in Kilogramm, Räder fest oder beweglich auf den Achsen.
12. Schmiervorrichtungen der Wagenachsen.
13. Anzahl der mit einem Zuge zu befördernden Wagen von je Kilogramm Gewicht ohne Last, Gewicht der Last für jeden Wagen, Gesamtgewicht eines Zuges.
14. Art des Betriebes: für Personen, Frachten oder gemischte Züge.
15. Ladeprofil für Wagen und Lokomotiven, äußerst zulässige Breite, Länge, Höhe, Länge zwischen den eventuellen Puffern, Maß von Mitte Puffer bis Schienenoberkante in Millimetern.
16. Art der Kuppelung, Mitte derselben, wie hoch über Schienenoberkante in Millimetern.

---

[1]) N. »Bau und Betrieb elektrischer Straßenbahnen« von Joh. Zacharias. Wilhelm Knapp, Halle/S.

Digitized by Google

17. Durchmesser der Drehscheiben in Metern.

18. Kraft für Antrieb der Dynamos, Wasser- oder Dampfkraft.

19. Größe der Wasserkraft in trockener Jahreszeit, Lage zur Strecke der Bahn.

20. Kosten des Feuerungsmaterials pro Tonne, frei Kraftwerk.

21. Wasserverhältnisse für das Kraftwerk zur Be- und Entwässerung für die Kondensation und Kesselspeisung.

22. Beschaffenheit der Kohle und des Speisewassers.

23. Höhe der Arbeitslöhne und Frachten.

24. Beschaffenheit der Straßen und des Untergrundes.

Kraftbedarf.

Bevor man die Größe und Anzahl von Maschinen bestimmen kann, sind zunächst eingehende Untersuchungen über den Höchstbedarf an Triebkraft, beziehungsweise elektrischer Energie anzustellen, worüber die nachstehenden Abschnitte Auskunft geben.

Bahnwiderstand und Zugkraft.

Der Widerstand W einer Bahn setzt sich zusammen aus den Widerständen w in der Ebene auf gerader Strecke, in den Kurven, in den Steigungen, aus Luftwiderstand, Unebenheiten des Geleises, rollender Reibung der Räder auf den Schienen und Achslagerreibung.

Wird w in Kilogramm pro Tonne Last angegeben, so ist für das Steigungsverhältnis $\frac{1}{n}$

$$W = w + 1000 \frac{1}{n}.$$

Digitized by Google

Ist V die Geschwindigkeit in Kilometern pro Stunde, so beträgt dieselbe in der Sekunde $v = \frac{V}{3{\cdot}6}$.

Ist P das Gewicht der Lokomotive, Q die Last aller Wagen mit Ladung in Tonnen und z die Zugkraft der Maschine in Kilogrammen, bei einem Verhältnis f ihres Gewichtes zur Zugkraft, so ist

$$f = \frac{1000\,P}{z} \text{ und } z = \frac{1000\,P}{f} = W\,(Q + P).$$

Nennen wir L die Leistung der Maschine in Pferdestärken und α den Nutzeffekt derselben, so haben wir

$$P = \frac{f \times W \times Q}{1000 - f \times W}$$

$$L = z \times v \times \frac{1}{75} \times \frac{1}{\alpha} = 3{\cdot}6 \times \frac{V \times W \times Q}{\alpha\,(1000 - f \times W)}.$$

Nach praktischen Ermittelungen ist bei günstigen Verhältnissen für Eisenbahnzüge mittlerer Länge

$$z = 2{\cdot}25 + \frac{v^2}{80} \pm 1000 \times i,$$

worin i das Steigungsverhältnis und v die Geschwindigkeit in Metern pro Sekunde bedeutet.

Kraftbedarf für einen Wagen in der Ebene.

$$E = \frac{9{\cdot}81 \times f}{4 \times 3{\cdot}6} \times G \times V = \text{Effekt in Watt oder}$$

rund $E = 50 \times G \times V$.

G = Wagengewicht in Tonnen,
V = Kilometer Fahrt in der Stunde,
f = Traktionskoäffizient.

Eine andere Berechnungsweise ist in folgenden Ausführungen gegeben.

Herr G. W. Knox in Chicago bringt auf Grund der allgemeinen Formel von J. B. Blood, welche im

Digitized by Google

Street Railway Journal vom März 1899, Seite 142, auf Seite 234 vom April 1899 derselben Zeitschrift und auf Seite 149 auf Grund von Ausführungen des Professors Geo. F. Swain gegeben war, folgende Formel für die Berechnung des Zugwiderstandes

$$R = B + W \cdot M + \frac{A \cdot M^n}{T}.$$

Hierin bedeutet:

R = den Bahnwiderstand,
M = die Geschwindigkeit,
T = das Gewicht des Zuges,
B = den Koëffizienten der Achslager = 3—4 bei guten Lagern und 5—6 bei neuen Lagern,
W = den Rad- und Schienenwiderstand = 0·15 bei richtigem Querschnitt der Schienen, passenden Radflanschen, gut verlegten Schienen und richtiger Größe der Räder,
A = den Luftwiderstand je nach dem Querschnitt des Zuges,
n = den Exponenten des Luftfaktors, der durch Versuche zu bestimmen ist; derselbe beträgt 1—2, gewöhnlich 1·8.

Für große Geschwindigkeiten muß A besonders bestimmt werden.

Es wirken folgende Teile der Fortbewegung des Zuges entgegen:

1. die Reibung der Achslager,
2. die Reibung der Räder auf den Schienen,
3. der Luftwiderstand,
4. die Reibung der Zahnräder,
5. die Reibung der Motorwelle.

Nr. 1 ist für alle Geschwindigkeiten fast konstant.

Nr. 2 ändert sich hauptsächlich mit der Geschwindigkeit.

Digitized by Google

Nr. 3 ist unabhängig vom Gewicht des Zuges und ändert sich als Funktion der Geschwindigkeit.

Kraftbedarf elektrischer Straßenbahnen.[1])

Der Kraftbedarf in Pferdestärken an den Bürsten des Motors eines elektrischen Straßenbahnwagens ist

$$PS = \frac{(1{\cdot}25 \times r + s)\, t \times v}{75\, k},$$

worin

t = Wagengewicht in Tonnen,

r = Traktionskoëffizient (= Zugkraft pro Tonne Wagengewicht in den Horizontalen mit gleicher Geschwindigkeit),

s = Steigung pro 1000 *m* in Metern,

v = Geschwindigkeit des Motors pro Sekunde,

k = Güterverhältnis des Motors, die Übertragung auf die Achsen inbegriffen.

Der Zuschlag von 25 % in der Formel mit $1{\cdot}25 \times r$ des Traktionskoëffizienten ist für den Verlust beim Anfahren hinzugerechnet, z. B.

Steigung 50 %,

Wagengewicht voll besetzt 8·8 *t*,

Geschwindigkeit 4 *m* pro Sekunde oder 14·4 *km* pro Stunde.

Gewöhnlich nimmt man

$$r = 12$$
$$k = 0{\cdot}70, \text{ also}$$

$$P\,S. = \frac{(1{\cdot}25 \times 12 + 50)\, 8{\cdot}8 \times 4}{75 \times 0{\cdot}70} = 43{\cdot}6\,PS.$$

Die hierfür in der Zentrale an der Dampfmaschine entsprechend erforderliche Kraft erhält man, wenn man noch den Leitungsverlust der Gesamt-Streckenleitung

[1]) Nach Ludwig Schröder, »Elektrotech. Zeitschrift«, S. 111, 1899. Nr. 5 vom 2. Februar.

Digitized

und das Güteverhältnis der Dynamomaschine mit in Rücksicht zieht.

Man ermittelt in dieser Weise den Kraftbedarf für jeden einzelnen Wagen, die Summe der ermittelten Größen ergibt den Gesamtkraftbedarf zu einer bestimmten Zeit des Fahrplanes. Das Maximum des Kraftbedarfes muß aus dem Längenprofil und dem zugehörigen graphischen Fahrplan der Straßen dadurch ermittelt werden, daß man die Rechnung für verschiedene Zeiten des Fahrplanes ausführt.

Rechnet man statt Pferdestärken A *kg* und einen Weg w statt der Geschwindigkeit v, so ist

$$A = \frac{(1{\cdot}25 \times r + s)\, t \times w}{0{\cdot}70} =$$

der auf einem bestimmten Stück einer Fahrplanlinie zu leistenden Arbeit in Kilogrammen.

Berechnung der Anzahl der fahrenden Wagen.[1])

Pm sei die mittlere Kraft.

Δ die Abweichung zwischen dem mittleren Wert und der berechneten Kraft.

Die Beobachtungsfehler werden nach der Methode der kleinsten Quadrate behandelt.

Ist m die Anzahl der Beobachtungen, n die Konstante in der Abhängigkeitsgleichung, welche den Vorgang definiert, so ist der Wert des wahrscheinlichen Beobachtungsfehlers

$$0{\cdot}674 \sqrt{\frac{\Sigma\,(\Delta^2)}{m-n}}.$$

In der Praxis gilt dieser Ausdruck der wahrscheinlichen Abweichung zwischen der höchsten Kraft die nötig ist und dem mittleren Maximum, aus der folgenden Gleichung

[1]) Nach Max Corsepius, »Sammlung elektrotechnischer Vorträge«, Heft 2, 1896.

Digitized by Google

$$M = (0{\cdot}674 \sqrt{\frac{\Sigma\,(\Delta^2)}{m-1}} + Pm)\,q$$

n ist gleich 1 und q die Anzahl der gleichzeitig fahrenden Wagen. Man kann jedoch auch wie folgt verfahren.

Es sei Pm die mittlere Kraft für eine Reihe von Augenblicken δ die Differenz zwischen diesen Werten und Pm. Die Stromstärken, die unter einer Minute auftreten, werden nicht berücksichtigt, da die Maschinen dies zufolge ihrer Überleistung gestatten; bei Zehnminutenverkehr ist dies also $^1/_{10}$ davon, man hat also

$$0{\cdot}674 \sqrt{\frac{\Sigma\,(\delta^2)}{m}}.$$

Während $^9/_{10}$ der Zeit ist die Schwankung der Kraft nicht größer als 2·5 mal.

α setzt man für 5 Minutenverkehr = 1·9
» 10 » = 2·5
» 15 » = 2·7
» 20 » = 2·9

Es ist dann

$$M = (0{\cdot}674 \sqrt{\frac{\Sigma\,(\delta^2)}{m}}\,\alpha + P).$$

Der Kraftbedarf während eines Tages richtet sich nach dem Verkehr, also nach der Anzahl der Wagen und der Witterung und hiernach auch die Anzahl der Anhängewagen und zwar im Sommer offene Anhängewagen und im Winter geschlossene Anhängewagen.

Annähernde Berechnung der Geschwindigkeit und Stromstärke auf verschiedenen Steigungen aus der Charakteristik des Motors. [1])

V = Geschwindigkeit in Kilometern pro Stunde

oder $= \frac{V}{3{\cdot}6}$ = Meter pro Sekunde.

[1]) S. 47 ff. Blondel Dubois: »La Traction Electrique«.

Kraftbedarf für Straßenbahnen.[1])

Spurweite und Ausrüstung	Plätze zirka	Tonnen pro Wagen im Dienst	Laufende Kilometer		Zulässige Steigung bis 500 m Länge		Zulässige Steigung bis 200 m Länge		Kilowatt, beziehungsweise Pferdestärken pro Wagen zu leisten in der Zentrale							
									Steigung Mittel							
									= 0·003		= 0·006		= 0·013		= 0·020	
			in Steigung	in Ebene	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
					Anhängewagen				Anhängewagen				Anhängewagen			
1 *m* 2 Motoren 12 PS.	25	6·5	10—15	15—25	0·028	0·010	0·035	0·015	9·5	15·5	12	19	16	—	—	—
									7	11·5	9	14	12	—	—	—
normal oder 1 *m* 1 Motor 20 PS.	30	7	10—15	15—25	0·02	0·05	0·043	0·022	9·5	15	12	—	15·5	—	17	—
									7	11	9	—	11·5	—	12·5	—
normal oder 1 *m* 2 Motoren 20 PS.	30	7·5	10—15	15—25	0·04	0·02	0·083	0·043	10	16	13	20	17	27	19·5	32·5
									7·5	12	9·5	15	12·5	20	14·5	24
normal oder 1 m 2 Motoren 20 PS.	40	8	10—15	15—25	0·038	0·013	0·077	0·033	11	17	13·5	21·5	17·5	28·5	20	34
									8	12·5	10·5	16	13	21	15	25
normal oder 1 *m* 1 Motor 35 PS.	40	7·5	10—15	15—25	0·04	0·02	0·083	0·043	11	17	13·5	21·5	17·5	28·5	22·5	36
									8	12·5	10	16	13	21	16·5	26·5
normal oder 1 *m* 2 Motoren 35 PS.	40	9	10—15	15—25	0·058	0·033	0·125	0·077	15	21	18	25·5	24	34	27	40
									11	15·5	13·5	19	18	25	20	30

Die oberen Zahlen sind Pferdestärken.
Die unteren Zahlen sind Kilowatt.

[1]) Auf Grund von Versuchen nach Corsepius.

Digitized by Google

UJ = Kraft in Watt.
g = Beschleunigung der Schwere,
η^m = Wirkungsgrad = ∞ 0·72.
F = Traktionswiderstand in Kilogramm.

$$\frac{FV}{3{\cdot}6} = \eta^m \frac{UJ}{g}$$

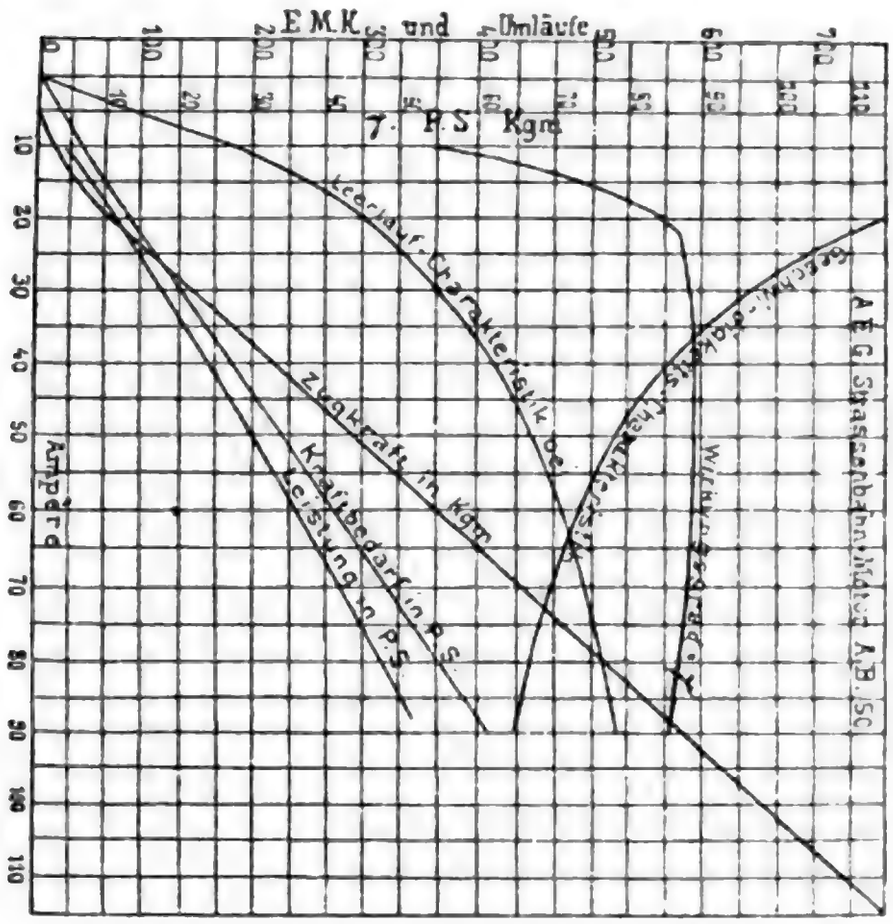


Fig. 118. Motorkurve.

β = Traktionskoëffizient des ganzen Zuges in Bezug auf Beschleunigung der Schwere,
i = Steigung

$$J = \frac{g\,V\,P\,(\beta + i}{3\,.\,6\,U\,\eta^m}.$$

P = Gesamtgewicht des Zuges.
Die Tafel gibt den Wert von

$$\frac{V\,(\beta + i)}{3{\cdot}6 \times 75}$$ und setzt man U = 500 Volt.

Digitized by Google

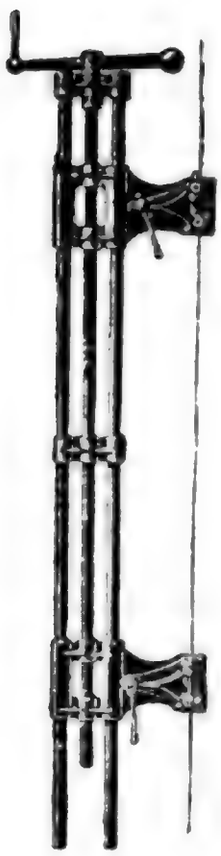


Fig. 119. Lötvorrichtung.

P = Gewicht in tons
β und i in Kilogramm pro ton, so hat man

$$J^{amp.} = 0{\cdot}0054\ 5\ \frac{V^{km:k}\ P^{tons}\ (\beta + i)^{kg:t}}{\eta^{m}}$$

hat man keine Kurve des Motors, so kann man setzen inklusive Zahnräderverlust

$\eta = 0{\cdot}65$ bei $^1/_4$ Last
» $= 0{\cdot}70$ » $^1/_2$ »
» $= 0{\cdot}75$—$0{\cdot}80$ bei voller Last

oder bei vorhandener Kurve nach Fischer-Hinner:

$$\frac{J}{V} = 0{\cdot}0054\ 5 \left(\frac{\beta + i}{\eta^{m}}\right) P.$$

In Fig. 118 sind Motorkurven eines Straßenbahnmotors der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft abgebildet, wie man sie für obige Zwecke aufstellt.

Höchster Kraftbedarf.

Anzahl der Wagen mit 2 Motoren im Dienst	Kraft indizierte PS. pro Wagen	
	bei 7 Tonnen 30 Plätze	bei 10 Tonnen 50 Plätze
25—30	10	15
15—25	12	20
10—15	15	25
1—5	20	30
	25	35

Bei starken Steigungen ist der Kraftbedarf entsprechend größer.

Bei kleinen Anlagen hat man entsprechend den größeren Schwankungen obige Zahlen wie folgt zu multiplizieren:

Digitized by Google

bei	4	Wagen mit	1·3
»	4—6	» »	1·2
»	6—10	» »	1·1
»	10	» »	1

je nach der Wichtigkeit der Anlagen.

Maschinensätze in der Kraftstation.

Nach den in Nordamerika üblichen Anordnungen hat man bei den verschiedenen Leistungen die folgenden Maschinensätze angeordnet:

P. S. maximal	Anzahl der Maschinensätze	P. S. pro Satz
200	2	200
400	3	200
600	3	300
1.000	3	500
1,500	4	500
2 000	4	750
5.000	6	1.000
10.000	6	2.000
20.000	6	4.000
40 000	9	5.000
60.000	10	6.000
90.000	11	10.000

In einem ausführlichen Aufsatze von Dr. M. Eisig [1]) werden mancherlei nützliche Winke bezüglich Wahl und Größe der Maschinen mitgeteilt.

Wirkungsgrad des Kraftwerkes.

Der Spannungsverlust u ist $= u\,\rho\,l\,\Delta$.

Hierin bedeutet ρ den spezifischen Widerstand des Leiters für die Länge,

Δ die Stromdichte.

[1]) S. »E.-T. Z.« vom 3. Juli 1902, Heft 27, S. 588—593. — »Street Railway Journal«, Bd. 16, S. 651.

Der Verlust in den Leitungen sei 9%, in den Schienen 1%, zusammen also 10%. Man hat jedoch oft 15%, bei nordamerikanischen Bahnen 20 auch 25% Verlust.

Die Gesamtkraft beträgt $Pi = \frac{Pj}{0{\cdot}40}$.

Hierin bedeutet Pj den Bedarf der Kraft an den Felgen,
0·40 der gesamte Nutzeffekt des Systems.

Wirkungsgrad der Dynamos.

Bei $^1/_4$ Belastung	0·85%
» $^1/_2$ »	0·90 »
» Vollbelastung.	0·92 »
» 25% Überlastung	0·90 »
im Mittel.	0·85 »

bei großem Betriebe rechnet man jedoch 0·90 bis 0·92%.

Wirkungsgrad von Straßenbahnen und Lokalbahnen.

Dieselben geben günstigenfalls folgenden Nutzeffekt

Motoren und Regulierung	Leitungen	Dampf-Dynamos	
0·70	0·90	0·80	= 0·50
		— 0·75	— 0·47%
		im Mittel	
0·60	0·90	0·75	= 0·40
		— 0·80	— 0·32% total

Digitized by Google

Ausführungsarbeiten.

Die Herstellung der Geleise muß naturgemäß der Verlegung der Straßenleitungen, insbesondere der Fahrdrähte vorausgehen, da dieselben in ihrer Lage von jenen abhängig sind.

Nachdem wir das Material, die Hilfsgeräte und die Vorschriften für die Oberleitungen kennen gelernt haben, erübrigt sich noch einiges über die Arbeitsweise beim Anbringen der Kontaktdrähte zu sagen.

Zunächst sind alle Befestigungspunkte für die Hängedrähte zu bestimmen, die erforderlichen Pfosten aufzustellen, beziehungsweise Wandplatten anzubringen und die Querdrähte in richtiger Höhe zu befestigen,[2]) wobei zugleich die Fahrdrahtisolatoren eingehängt, eingebunden oder festgeklemmt werden.

Sind die Schienen inzwischen fertig verlegt, so beginnt das Ausziehen des Fahrdrahtes. Derselbe wird auf Holztrommeln geliefert, in den früher beschriebenen Karren gelegt und abgerollt. Eine Arbeiterabteilung mit einem Turmwagen fährt hinterdrein und bindet den Kontaktdraht vorläufig neben den Isolatoren mit Draht oder Stricken fest. Um den Verkehr nicht zu stören, wird diese Arbeit gewöhnlich des Nachts ausgeführt. Am Tage erfolgt das Anlöten der Tragösen, mit besonders hierfür gestalteten Lötkolben. Hierbei wird die Oberleitung entsprechend der schon früher gegebenen Tabelle nach einem Dynamomotor mit Drahtwinde gespannt und gerichtet.

Beim Vereinigen zweier Enden in einer Hülse oder Lötmuffe gebraucht man einen Flaschenzug mit Froschklemmen[3]) oder die in Fig. 119 abgebildete

---

[2]) Ausführliche Anweisungen gibt Dawsons Pocket Book, deutsch von Joh. Zacharias, Halle, a. d. S. 1903.

[3]) S. »Die elektrischen Leitungen und ihre Anlage«, von Joh. Zacharias, II. Auflage, S. 49. A. Hartleben, Wien.

Digitized by Google

Spannvorrichtung, mit welcher man leicht und sicher solche Verbindungen ausführen kann.

Besonders schwierig gestaltet sich das Anlöten des Fahrdrahtes in Krümmungen, wie eine solche z. B. in Fig. 120 dargestellt ist. Es kreuzen hier zwei zweigeleisige Strecken, welche durch eine Kurve verbunden sind. Die Abspannung muß nach den zuvor gegebenen Tabellen erfolgen. Die Arbeit erfordert viel Erfahrung und Umsicht.

Die an den Fahrdraht angelöteten Tragösen werden sofort an die Isolatoren angeschraubt. Nach Vollendung einer Strecke sind die Sektionsschalter, Speiseleitungen und Blitzableiter anzubringen.

Nach Vollendung der Arbeiten erfolgen Probefahrten, Einüben und Unterweisung des Personals und schließlich die behördliche Befahrung und Abnahme.

Für die Handhabung der Motorwagen gelten besondere Vorschriften, von denen eine, bei vielen Betrieben angewendete, als Beispiel in dem Abschnitte über die Fahrschalter mitgeteilt ist.

Digitized

6. Beschreibung einiger Bahnen.

Um eine Vorstellung von dem Umfange und der Einrichtung ausgeführter Anlagen zu geben, haben wir nachstehend aus deren großer Zahl einige ausgewählt.

Die folgende Tabelle gibt zunächst ein Bild über das Verhältnis der Einwohnerzahl verschiedener Städte zur Länge der Geleise und Größe der Anlagen.

In Nordamerika kommen auf 1 Meile oder 1·6 *km* Straßenbahn 588—2000 Einwohner, in England 8422 bis 22523 in den großen Städten.[4])

Straßenbahn in St. Gallen.

Im Jahre 1893 war die Frage einer Straßenbahn für St. Gallen und dessen nächsten Außengemeinden durch ein Initiativ-Komitee aufgegriffen worden. Man dachte anfangs daran, die Straßenbahnwagen mit Gasmotoren auszurüsten und nach dem System Lührig komprimiertes Leuchtgas als Kraftquelle zu verwenden, doch hätten die von Lührig vorgeschlagenen 10—15 PS. Gasmotoren für die Gefällsverhältnisse der Strecken Bruggen-Neudorf und Heiligkreuz nicht genügt. Das Projekt einer Gastrambahn wurde fallen gelassen, dafür trat jenes eines elektrischen Betriebes der Straßenbahn in den Vordergrund. Die Betriebskraft sollte nach dem ersten Projekte durch eine Generator-Gasanlage geliefert

[4]) N. »Elektric Railways and Tramways by Philip Dawson«. London.

werden. Diese Betriebsquelle kam jedoch bald außer Kombination, da das unterdessen in städtisches Eigentum übergegangene Gaswerk in der Lage war, das zum Betriebe von Gasmotoren nötige Leuchtgas zu liefern.[1])

Als das Initiativ-Komitee, welches am 4. November 1894 vom Gemeinderate der Stadt die Konzession für den Bau und Betrieb einer Straßenbahn erhalten hatte, an die Finanzierung des Unternehmens schritt, wurde in einer am 28. August 1895 abgehaltenen Volksversammlung dem Wunsche Ausdruck gegeben, daß die Gemeinde selbst den Bau und Betrieb der Straßenbahnen übernehmen solle. In der am 10. November 1895 stattgefundenen Bürgerversammlung wurden die dahin zielenden Anträge einstimmig zum Beschlusse erhoben, worauf sofort an die Ausführung der Arbeiten geschritten und die Konzession für die Straßenbahn von dem Initiativ-Komitee an die Stadt abgetreten wurde.

Die Spannung im Leitungsnetze der Straßenbahn wurde mit 500 Volt und der maximale Spannungsverlust in den Straßenbahnleitungen mit 50 Volt festgesetzt.

Die Lieferung sämtlicher elektrischer Arbeiten wurden der Maschinenfabrik Örlikon übertragen. Die Betriebseröffnung der Straßenbahn fand am 20. Mai 1897 statt.

Tracé. Die Linie Bruggen—Heiligkreuz geht vom Brauereigebäude in Stocken aus, führt durch das Dorf Bruggen, über Schönenwegen, Lachen, Stahl, durch die Rosenbergstraße, gegen den Viehmarkt und Kübelmarktplatz, durch die Goliathgasse, St. Jakobstraße, vor der Brauerei Schützengarten vorüber, bis nach Heiligkreuz. Hierbei wird die Staatsstraße zweimal gekreuzt. Die Linie Bahnhof—Krontal geht vom Bahnhofplatz aus

[1]) Nach freundlich gewährten Unterlagen der Maschinenfabrik Örlikon, Aktien-Gesellschaft zu Örlikon bei Zürich.

Elektrische

erbaut von der Allgemeinen

Ort	Einwohner der Stadt mit Vororten		Betrieb eröffnet	Geleislänge	Motorwagen
Halle a/S.	120.000	130 000	Mai 1891	25·5	58
Gera	44 000	52.000	Februar 1892	10 7	26
Kiew	300 000	—	Mai 1892	28·6	56
Breslau	380.000	—	Juni 1893	31	85
Essen	100.000	300.000	August 1893	22	24
Chemnitz	165.000	—	August 1894	31·2	61
Christiania	180 000	—		7·5	22
Dortmund	112.000	—	Mai 1894	25·8	60
Lübeck	70.000	—	Mai 1894	17·7	29
Plauen	56.000	—	November 1894	5·8	13
Königsbg. i/P.	175.000	—	—	17·1	29
Altenbg. S. A.	35.000	—	—	4 1	7
Straßbg. i/E.	140.000	—	—	30 2	74
Stuttgart	160.000	—	November 1895	19 5	65
Genova	220.000	350.000	—	115	155
	Von obigen 115 *Km* liegen 6 *Km* in Tunnels, eine				
Spandau	56.000	—	März 1896	12·6	24
Bilbao	70 000	—	März 1896	37 4	48
Kiel	85.700	111 000	Mai 1896	20·4	41
Leipzig	400.000	—	Mai 1896	74	110
Nürnberg-Fürth	163.000	—	Mai 1896	47.2	68
Bromberg	65.000	—	Juli 1896	7·9	20
Danzig	130.000	—	August 1896	27·5	43
Bernburg	34.000	—	August 1897	3·8	9
Heilbronn	36.000	—	Juni 1897	5·2	15
Stettin	142 000	—	Juli 1897	38·5	82
Eisenach	25.000	—	—	3·8	5
Braunschw.	120.000	—	Oktober 1897	43·1	70
Duisburg	75 000	—	Dezember 1897	24·5	55
Görlitz	75.000	—	Dezember 1897	15	26
Frankf. a/O.	60.000	—	Januar 1898	11	24
Lodz	330.000	—	Dezember 1898	16·2	30
Santiago-Chile	300.000	—	—	117	170
Barcelona	280.000	—	—	52	70

Straßenbahnen

Elektrizitäts-Gesellschaft.

Anhängwagen	Maschinenleistung HP	Brutto Einnahmen Mark	Wagen Kilometer	Jahr der Daten	Bemerkungen
20	525	398.676·07	1,519.062	1898	
16	525	—	—	1900	
10	700	—	—	1900	Steigungen 1:13·7—1:9·5
100	900	906.895·35	3,016.814	1898	10 Pfg. Tarif
17	540	—	—	1900	Straßen-, teilweise nur 3·5 *m* Fahrdammbreite
47	720	617.954·48	2,180.052	1898	10 Pfg. Tarif
12	700	—	—	1900	
20	540	614.889·20	1,427.608	1898	
26	540	262.544 66	1,021.021	1898	
—	200	—	—	1900	
—	—	—	—	1900	Städtisches Elektrisches Werk mit Lichtwerk
—	330	62.720·94	249.301		
70	—	304.905·18	580.616	1897/98	Umgegend hat 200 *Km* Dampfkleinbahnen
65	—	1,074 896	2,486.180	1898	
75	7000 1000	3,034.948 *L.*	5,765.706	1898/99	bis 1890 nur eine Pferdebahnlinie
Drahtseilbahn von 1·6 *Km* mit 0·7 *Km* in Tunnels, auch Lichtbetrieb					
20	300	209.020·56	728 661	1898	
90	1500	—	—	—	
18	600	342.301·39	1.644.278	1898	
50	1850	1,324.069·39	5,316.383	1898	
50	800			1900	
14	670	163.186·85	622 032	1898	
53	600	624.781·62	1,974.636	1898	
—	—	46 402·90	276.169	1898	Licht und Kraftwerk
3	—	—	—	—	
40	1000	838.800·30	2,760.441	1898	
4	—	—	—	—	Strom vom Lichtwerk
61	900	667.085·03	2,455.544	1898	
35	600	432.704·24	1,071.217	1898	
12	—	200.088·07	777.785	1898	
6	450	183.019·89	695.454	1898	Licht und Kraftwerk
30	1100	—	—	—	Hatte bis dato keine Straßenbahn
150	—	—	—	—	
75	—	—	—	—	Elektrisches Werk mit 7000 PS.

durch die Poststraße über den Marktplatz nach der Rohrschacherstraße bis zum Endpunkt in Krontal.

Da die Straßen ziemlich enge sind, wurde die Bahn, mit Ausnahme der zweigeleisigen, gemeinschaftlichen Strecke beider Linien auf dem Marktplatze, einspurig ausgeführt. Die Ausweichgeleise, deren größte Länge 120 *m*, deren kleinste 50 *m* beträgt, wurden auf den Strecken Stahl—Post—Langgasse und Bahnhof—Krontal für den Fünfminuten-Betrieb, auf den Strecken Schönenwegen—Stahl und Post—Langgasse—Heiligkreuz für den Zehnminuten-Betrieb und auf der Strecke Schönenwegen-Bruggen für den Zwanzigminuten-Betrieb angeordnet.

Die Achsendistanz der Ausweichgeleise beträgt 2·5 *m*, so daß zwischen zwei sich kreuzenden Wagen eine Lichtweite von 50 *cm* übrig bleibt. Die Geleiseentfernung vom nächstgelegenen Trottoirrandstein beträgt normal 1·6 *m*, minimal 1·3 *m*. Der Minimalabstand von Gebäuden, Einfriedungen oder Mauern ist mit 2 *m* festgesetzt. Die Länge der durchgehenden Geleise beider Linien beträgt 9·282 *km*, die des zum Depot führenden Geleises in der Langgasse 0·446 *km*. Die Gesamtlänge der Ausweichgeleise ist 1·913 *km*, die totale Geleiselänge 11·641 *km*. Die Zahl der Weichen beträgt 42.

Richtungsverhältnisse. Die namentlich im Stadtgebiete herrschenden, engen Straßenverhältnisse übten einen nachteiligen Einfluß auf die Richtungsverhältnisse aus und erforderten kleine Minimalradien. Der kleinste Radius, welcher bei drei Kurven zur Anwendung kam, beträgt 15 *m*. Von der gesamten Geleiselänge liegen 3·749 *km* (32·2%) in Kurven, der übrige Teil (67·8%) in Geraden. Da die Lage der Geleise den Straßenwölbungen angepaßt werden mußte, kommen Überhöhungen bis zu maximal 6 *cm* vor.

Steigungsverhältnisse. Dieselben sind ziemlich ungünstig, namentlich auf der Strecke Bruggen—Heiligkreuz. Die Maximalsteigung beträgt 6·4% (in der Goliath-

gasse auf zirka 50 *m*). Die übrigen bedeutenderen Steigungen sind in nachstehender Tabelle verzeichnet:

Strecke	Steigung in Prozenten	Auf einer Länge von Metern
Bei der Kirche Bruggen . . .	2·99	195
Auf der nach der Kirche folgenden Strecke	2·79—4·36	280
Schönenwegen—Lachen . . .	4·42—4·65	500
Lachen—Stahl	4·5	65
Beim Kirchhof St. Fiden . . .	4·85	105

Unterbau. Die Unterbauarbeiten beschränkten sich auf die Korrektion der Goliathgasse, deren frühere Steigung von 9·5% durch Verteilung des Gefälles auf 5·7% ausgeglichen wurde, und auf die Erstellung der Endstation Bruggen, welche die Aufstellung von Stützmauern und eine Auffüllung erforderte.

Oberbau. Die Schienen liegen auf einer Steinbettung von je 40 *cm* Breite und 25 *cm* Stärke und auf einer Kiesschüttung von 10 *cm* Höhe. In den ungepflasterten Straßen sind zu beiden Seiten der Schienenköpfe Steinbettungen von 15 *cm* Stärke und 20 *cm* Breite angeordnet. Die Spurweite der Geleise, welche 1 *m* beträgt, wurde in den Kurven von 15 bis 20 *m* Radius auf 1·003 *m* erweitert.

Die Rillenschienen, Hörde Prof. Nr. 29, haben eine Fußbreite von 150 *mm*, Höhe von 150 *mm*, Rillenbreite von 33 *mm*, Rillentiefe von 30 *mm*, Trägheitsmoment von 1787·4, Widerstandsmoment von 214·95 und Gewicht von 42·8 *kg* per l. Meter. Die normale Schienenlänge beträgt 12 *m*. Die Laschen haben [-förmiges Profil und eine Länge von 750 *mm*. Das Gewicht pro 1 *m* Geleise beträgt 93·6 *kg*.

Die Weichen sind automatische Zungenweichen mit zwei beweglichen Zungen, welche mit besonderen, im Kasten verschlossenen Federn an die Mutterschiene angedrückt werden, und verstellbaren Gewichtsweichen.

Gebäude. Die Wagenremise, 61·5 *m* lang, 14·5 *m* breit und 5·2 *m* hoch, hat vier Geleise und bietet Raum für 28 Motorwagen. Unter den Geleisen befindet sich eine einzige über das ganze Gebäude sich erstreckende »Putzgrube« von 1·6 *m* Tiefe. An der der Maschinenhalle zu gelegenen Gebäudeseite der Remise ist außerhalb derselben noch ein fünfter Geleisestrang (Reserve) in einer überdachten und nach der Maschinenhalle zu offenen Galerie verlegt.

Auf dem Kübelmarkte befindet sich ein Wartepavillon von 9·3 *m* Länge und 7·5 *m* Breite, welcher in Riegelbau ausgeführt ist. Dieser Pavillon enthält ein Wartezimmer mit gedeckter Vorhalle, die Räume für das Fahrpersonal, das Wärterlokal und ein öffentliches Kloset.

Leitungsnetz.

Die Betriebsspannung beträgt 550 Volt, der maximale Spannungsverlust 50 Volt. Das gesamte Leitungsnetz ist in vier Abschnitte: Bruggen—Viehmarkt, Heiligkreuz—Blumenaubrücke, Stadt und Krontal, Blumenaustraße eingeteilt. Die von den Tramsammelschienen abgehenden vier Speiseleitungen treten aus der Hauptzentrale an der nordwestlichen Ecke des Gebäudes heraus und sind, mit Ausnahme jener für den Abschnitt Heiligkreuz—Blumenaubrücke bestimmten, welche in einem eigenen Graben in der Jägerstraße verlegt ist, im gleichen Graben mit den Speiseleitungen für das Beleuchtungsnetz untergebracht. Die Tram-Speiseleitungen, welche ebenso wie die Beleuchtungskabel ausgeführt sind, münden in gußeiserne Ausschalterkasten, auf welche ein Ausschalterhebel montiert ist.

Von diesen Ausschalterkasten führen gut isolierte Kabel zu den Anschlußösen, welche an Aufhängekulissen angegossen sind. Die Anschlußstellen der Kabel an die oberirdische Kontaktleitung haben eingeschaltete Blitzschutzvorrichtungen.

Die Speiseleitung für den Abschnitt Bruggen—Viehmarkt in der Ortschaft Lachen an die Kontaktleitung angeschlossen hat eine Länge von 2700 *m* und einen Querschnitt von 200 *qmm*. Zur Verstärkung der Kontaktleitung dient eine an die Hauptspeiseleitung anschließende 910 *m* lange Speiseleitung, welche aus 8 *mm* starkem Kupferdraht besteht und auf dem Kontaktgestänge montiert ist. Die Rückleitung erfolgt durch einen 8 *mm* starken, nackten Kupferdraht.

Die Speiseleitung für den Abschnitt Heiligkreuz—Blumenaubrücke ist bei der Einmündung der Jägerstraße in die St. Jakobstraße angeschlossen, hat einen Querschnitt von 150 *qmm* und eine Länge von 110 *m*. Für diesen Abschnitt wurde eine Rückleitung von 50 *qmm* Querschnitt und 309 *m* Länge vorgesehen. Diese Rückleitung wurde als isoliertes Kabel ausgeführt, weil sie nahe an der Hauptzentrale vorüberführt.

Die für die Stadt bestimmte Speiseleitung ist beim Notfeststein angeschlossen, hat einen Querschnitt von 150 *qmm* und eine Länge von 700 *m*. Als Rückleitung dient ein 8 *mm* nackter Kupferdraht.

Die Speiseleitung für den Abschnitt Krontal—Blumenaustraße ist beim Depot angeschlossen, hat einen Querschnitt von 100 *qmm*, eine Länge von 300 *m* und einen 8 *mm* nackten Kupferdraht als Rückleitung.

Außer den Rückleitungsdrähten dienen auch die Schienen zur Rückleitung des Stromes. Zu diesem Zwecke sind die Schienenstöße mit 6 *mm* starkem, verzinktem Kupferdraht, welcher mit den Schienen gut vernietet ist, verbunden. Diese Schienenverbindungen sind außerdem noch alle 50 *m* durch einen 6 *mm*

starken Kupferdraht miteinander in Verbindung gebracht.

Die Kontaktleitung besteht aus hartgezogenem Kupferdraht von 8 *mm* Durchmesser und zirka 3000 *kg* Bruchfestigkeit. Die Kontaktleitung ist 6·5 *m* über dem Boden doppelt isoliert aufgehängt und durch Streckenausschalter unterbrochen. Die Zugspannung im Kontaktdraht beträgt zirka 500 *kg*. Die Aufhängung des Kontaktdrahtes erfolgt stets direkt auf Auslegemasten oder Abspanndrähten. Letztere sind an Mauerrosetten oder Spannmasten befestigt und aus galvanisiertem Stahldraht von 6 *mm* Durchmesser und 500 *kg* Zugfestigkeit hergestellt. Die größte Abspannung beträgt zirka 80 *m*, die kleinste 5 *m*. Auf den Auslegermasten ist der Kontaktdraht mittels isolierten Stahldrahtes federnd aufgehängt. Die Gesamtlänge des verwendeten Kontaktdrahtes ist 11·3 *km*; das Gewicht des hierzu verwendeten Kupfers beträgt 5·05 Tonnen. Es sind 42 Luftweichen vorhanden.

Die Abspannmaste und Ausleger sind teils aus Mannesmannröhren, teils aus imprägniertem Holz hergestellt. Die hölzernen Auslegermasten haben Auslegerarme, welche aus Gasrohr gefertigt sind. Sämtliche Maste sind 1·6 *m* tief im Boden einbetoniert und haben eine totale Länge von 7·5 *m*. Im ganzen kamen zur Verwendung: 176 hölzerne und 124 eiserne Spannmasten, 56 hölzerne und 50 eiserne Auslegermasten, 152 Mauerrosetten, 253 einfache und 30 verlängerte Streckenisolatoren, 120 Doppelkurvenisolatoren, 59 einfache Kurvenisolatoren, 243 Hängeisolatoren, 357 Erdisolatoren und 30 Spezialisolatoren.

Zum Schutze gegen herabfallende Telephon- und Telegraphendrähte sind parallel zum Kontaktdrahte Schutzdrähte gezogen, welche teils auf den Auslegermasten, teils auf separater Abspannung isoliert aufgehängt sind. Diese Schutzdrähte sind durch einen

besonderen, 6 *mm* starken Kupfer-Erdleitungsdraht mit den Schienen verbunden. Die Schutzdrähte bestehen aus 6 *mm* Stahldraht und sind durch Querdrähte aus 4 *mm* hartgezogenem Stahldraht verbunden.

Rollmaterial.

Dasselbe besteht aus 30 Motorwagen, 4 Anhängewagen, 1 Schneefegemaschine und 2 Güterwagen.

Der von der Schweizer Industriegesellschaft in Neuhausen gelieferte mechanische Teil der Wagen Nr. 1 bis Nr. 28 besteht aus zwei Hauptteilen, dem Untergestell mit Tragrahmen für die Motoren und aus dem Wagenkasten, welcher sich nach Lösung von acht Schrauben leicht vom Untergestelle abheben läßt. Das Untergestell ist aus Profileisen und zwei starken, mit Winkeleisen armierten Blechträgern hergestellt. Letztere sind durch Kopfstücke und Querträger aus Profileisen miteinander verbunden. Die Achsen und Bandagen sind aus Flußstahl, die Radsterne aus Schmiedeeisen hergestellt. Die Zug- und Stoßvorrichtung ist zentral angeordnet; die Zugstange läßt sich um ihren Drehpunkt nach oben, unten, links und rechts bewegen. Die Wagen haben, um starke Stöße aufzuheben, eine doppelte Abfederung. Der Durchmesser der Laufräder beträgt 800 *mm*. Der Wagenkasten ist aus Holz gefertigt und mit Blechtafeln verkleidet. Das Wagendach ist mit wasserdichtem Segeltuch belegt.

Die Wagen sind außer der elektrischen Bremse noch mit der Handbremse ausgerüstet, und zwar die Wagen Nr. 1 bis Nr. 22 mit vierklötzigen und Nr. 23 bis 28 mit achtklötzigen Handbremsen.

Der Radstand der Wagen Nr. 1 bis Nr. 58 beträgt 1·5 *m*, die Wagenlänge 7·13 *m*, die Wagenbreite 2 *m*, das Wagengewicht 7,5 Tonnen. Jeder Wagen hat 16 Sitzplätze und 14 Stehplätze.

Die elektrische Ausrüstung der Motorwagen Nr. 1 bis Nr. 28 besteht aus zwei Motoren von je 20 PS. Leistung, 2 Regulierapparaten mit 6 verschiedenen Regulierstufen, zwei Sicherheitsausschaltern, 1 Bleisicherung, 1 Blitzschutzvorrichtung, 1 Kontaktbügel, der elektrischen Heizung und Beleuchtung. Die beiden vierpoligen, mit Reihenschaltung versehenen 20 PS. starken Motoren sind in einem geschlossenen Stahlgußgehäuse untergebracht und übertragen mittels Zahnradvorgelegen die Bewegung auf die Laufachsen. Die Armatur der Motoren hat einen Durchmesser von 404 *mm*, eine Eisenbreite von 300 *mm*. Die Wicklung ist nach dem Grammering durchgeführt. Es sind 59 Nuten mit je 12 Windungen von je 2·2—2·8 *mm* Draht vorhanden. Die Magnete haben 120 Windungen von 3·5—4 *mm* Draht in acht Lagen angeordnet. Der Kollektor besteht aus 118 Lamellen. Durch die Regulierapparate (System Serie-Parallel), welche mit den notwendigen Vorschalt- und Bremswiderständen ausgerüstet sind, werden die Motoren zum Anfahren und für langsame Fahrt in Reihe, für schnelle Fahrt und größere Kraftleistungen parallel geschaltet. Die gleichen Schalter können für Vor- und Rückwärtsgang benutzt werden.

Die Stromabnahme erfolgt durch einen Kontaktbügel. Die Stromabnahme-Vorrichtung ist aus Mannesmannstahlrohr hergestellt, zangenförmig geformt und trägt oben den eigentlichen Abnahmebügel aufgesetzt. Letzterer ist aus 10 *mm* starkem und 50 *mm* breitem Aluminiumblech hergestellt. Die äußerste Breite der Kontaktvorrichtung beträgt 1·6 *m*, ihre Länge 3·1 *m*, das Gewicht 8·5 *kg*. Der Bügelbock ist so eingerichtet, daß die Federn zur Zeit, wenn die Wagen im Depot stehen, entlastet werden können. Zur besseren Ableitung des aufgenommenen Stromes ist der Aluminiumbügel noch durch einen längs der Kontaktvorrichtung

herabgehenden Kupferdraht mit den Kabeln, welche den Motoren den Strom zuführen, verbunden.

Jeder Wagen wird durch zwei elektrische Heizkörper von 1 Kilowatt geheizt und durch 10 Glühlampen, welche in zwei Stromkreise geschaltet sind, beleuchtet.

Das Untergestell der zweiachsigen Wagen Nr. 29 und Nr. 30, welche von der Schweizer Wagen- und Waggonfabrik A.-G. Schlieren, gebaut wurden, zerfällt in zwei Teile und zwar in das eigentliche Motorengestell und in das, den Wagenkasten und die Plattformen tragende Kastengestell. Das Motorgestell besteht aus Preßlangträgern und Profileisen und ist auf den Achsenbüchsen elastisch gelagert. Dieses Gestell, an welches auch die beiden Motoren aufgehängt sind, trägt eine achtklötzige Bremse keilförmige Bahnräumer und die Federn. Das Kastengestell besteht aus einem Profileisenrahmen und ruht mittels kräftiger Schrauben, Spiral- und Blattfedern auf dem Motorgestell, in welchem es entsprechend geführt ist.

Die Radsätze sind nach dem Typ Van der Zypen ausgeführt. Die Zug- und Stoßvorrichtung besteht aus einem starken beiderseitig abgefederten Zentralpuffer aus Schmiedeeisen mit rechteckiger Stoßplatte, welcher mit einem vertikalen Einsteckbolzen, zum Befestigen des Kuppeleisens, versehen ist. Die achtklötzige Spindelbremse kann von beiden Plattformen aus angezogen werden. Die Wagen sind mit vier, von den Führerständen mittels Fußtrittes zu betätigenden Sandstreuapparaten ausgestattet.

Die Wagenkasten sind als abgeschlossene Konstruktion mit Oberlichtaufbau und Längssitzen im Wageninnern ausgeführt. Das Kastengerippe besteht aus Eichenholz, Boden und Dachbretter aus Tannenholz. Die äußere Wagenverschalung ist aus gespannten Blechtafeln hergestellt. Unter den aufklappbaren Latten-

bänken, welche als Sitze dienen, sind die Sandstreu- und Werkzeugkasten, sowie die elektrischen Heizkörper untergebracht. Die Plattformen sind ganz geschlossen und mit seitlich verschließbaren Türen versehen.

Die Wagen enthalten im Innern 16 Sitzplätze, vorn 7, hinten 10 Stehplätze.

Die maximale Wagenbreite beträgt 2·0 *m*, die über die Puffer gemessene Wagenlänge 8·0 *m*, die Höhe von Schienenoberkante bis über Oberlicht ohne Stromabnehmerbohlen 3·2 *m*.

Die Wagen sind mit je zwei Motoren, Maschinentype Örlikon T M 8 ausgestattet. Die Motoren, welche je 37 PS. leisten, haben ein geschlossenes Gehäuse aus Stahlguß, das zugleich als Magnetkranz dient. Die aus lamelliertem Eisenblech hergestellten Magnetpole sind im Innern des Gehäuses angeschraubt. Die beiden Hälften des Gehäuses sind aufklappbar, so daß das Innere des Gehäuses vollständig zugänglich ist und der Anker bequem ausgewechselt werden kann. Die Motorlager sind mit Ringschmierung, die Triebachsenlager mit Filzschmierung versehen. Die Stromabnahme am Kollektor erfolgt bei jedem Motor durch vier Kollektorbürsten. Durch die sogenannten Kollektor-Revisionsöffnungen ist es möglich, beim fertig montierten Wagen von oben bequem zu den Kollektorbürsten gelangen können.

Der Durchmesser der Armatur beträgt 390 *mm*, ihre Breite 150 *mm*. Jede der Nuten von 14·5×37 *mm* enthält 30 Drähte von 2·75—3 *mm*. Die Drähte sind mit Tussaseide dreifach besponnen und lackiert. Der Kollektor hat 111 Kupferlamellen mit 0·8 *mm* Mikaisolation. Die Magnetbohrung beträgt 396 *mm*. Die vier in Reihe gewickelten Magnetspulen haben je 85 Windungen von 5·5—6 *mm* Draht.

Der Schutzkasten für die Zahnradübersetzung ist am Motor-Oberteil befestigt und zweiteilig.

Die Stromabnahme von dem Fahrdrahte erfolgt durch eine Bügelkontaktvorrichtung.

Die Anhängewagen sind zweiachsig und als geschlossene Konstruktion für 12 Sitzplätze im Innern und 12 Stehplätze auf den Plattformen ausgeführt. Die maximale Wagenbreite beträgt 2 *m*, die Länge, über die Puffer gemessen, 5·96 *m* und die Höhe von Schienenoberkante bis über Oberlicht 2·98 *m*.

An das aus leichten Blechträgern hergestellte und durch Blattfedern abgefederte Untergestell sind eine vierklötzige Bremse, eine elektromagnetische Scheibenbremse, welche vom Kontrolleur des Motorwagens aus betätigt wird, und Bahnräumer aufgehängt. Die Zug- und Stoßvorrichtung und der Wagenkasten sind in ähnlicher Art wie bei den Motorwagen ausgeführt.

Die Güterwagen, welche zum Nachführen von Sand, respektive Salz, beim Sanden, respektive Salzen, der Geleise dienen, haben einen Achsenstand von 1·5 *m*, Ladefläche von 5 *qm*, Gewicht von 819 *kg* und Tragfähigkeit von 2·5 Tonnen.

Geschwindigkeiten. Als Maximalgeschwindigkeit (Aufenthalt nicht mitgerechnet) sind angenommen: im Weichbilde der Stadt 10—12 *km*, auf den weniger dicht bebauten Straßenstrecken der Stadt- und Außengemeinden 15 *km* und auf den freien Strecken außerhalb der Stadt 18—20 *km*.

Die Fahrzeit der Strecken Bruggen—Heiligkreuz beträgt 24½ Minuten, mit Aufenthalt 33 Minuten, Bahnhof Krontal 9, beziehungsweise 12 Minuten.

Auf der Strecke Bruggen—Schönenwegen ist Zwanzigminuten-Betrieb, Schönenwegen—Heiligkreuz ist Zehnminuten-Betrieb, Bahnhof—Krontal ist Zehnminuten-Betrieb und auf den Strecken Bahnhof—Krontal und Lachen—Post—Langgasse ist in der Zeit von morgens 11¼ Uhr bis abends 8 Uhr Fünfminuten-

Betrieb eingerichtet. Der Aufenthalt auf den Endstationen beträgt 2·10 Minuten.

Betrieb.

Die Anlagekosten der Straßenbahn betrugen Ende 1900 total 1,340.910 Franken.

Die Wartehalle am Kübelmarkt kostete 10.679·30 Franken.

Die Straßenbahn verkehrt von morgens 6 Uhr bis abends 10 Uhr. Im Winter finden Extrafahrten nach Schluß des Theaters statt.

Straßenbahnverkehr. Im Betriebsjahre 1900 betrug die Zahl der zurückgelegten Wagenkilometer 762.490, die Zahl der beförderten Reisenden total 2,586.000 oder pro Wagenkilometer 3·39. Der für diesen Verkehr gemessene Energieverbrauch betrug total 486.527 Kilowattstunden,

Taxen. Die Fahrpreise für die Straßenbahn werden nach Taxstrecken berechnet. Die Strecke Bruggen—Heiligkreuz ist in sieben, Bahnhof—Krontal in vier Taxstrecken eingeteilt. Eine Taxstrecke (durchschnittlich 930 *m* lang) wird mit 10 Cts., jede weitere mit je 5 Cts. mehr berechnet. Außerdem werden Abonnements ausgegeben.

Personal. Das Personal für den Straßenbahnbetrieb besteht aus:

1 Betriebschef (zugleich Ingenieur der Elektrizitätswerke), 1 Adjunkten, 1 Buchhalter, 2 Schreiber, 2 Bahnwärter, 3 Hilfsbahnwärter, 3 Kontrolleure, 24 Billeteure, 10 Billeteur-Ablöser, 24 Wagenführer, 10 Wagenführer-Ablöser, 1 Depotchef, 20 Werkstättenarbeiter.

Straßenbahn Altstätten—Berneck.

Tracé. Die Linie, welche sich vom Bahnhof Altstätten bis zum Rathaus in Berneck erstreckt und 11·7 *km* mißt, ist vollständig auf die Staatsstraße ver-

legt. Die maximale Steigung liegt innerhalb der Ortschaft Berneck. Diese Steigung erstreckt sich auf eine Länge von 55 *m* und beträgt 52‰. Die durchschnittliche Steigung der ganzen Linie beträgt 13·75‰, der kleinste Kurvenradius 25 *m*. Die Spurweite der mit automatischen Weichen versehenen, eingeleisigen Linie beträgt 1 *m*. Die Schienen, Hartwig-Profil, haben eine Fußbreite von 109 *mm*, Höhe von 135 *mm* und wiegen 24·5 *kg* per laufenden Meter. Sie sind auf einer Steinbettung von je 200 *mm* Breite und 180 *mm* Stärke, auf welcher sich eine Kiesschicht von 65 *mm* Höhe befindet, verlegt.

Stromzuführung. Die Stromzuführung nach den Wagenmotoren erfolgt durch oberirdische Leitung und Trolleystromabnahme. Die Betriebsspannung beträgt 600 Volt. Die Rückleitung erfolgt durch die Schienen die an den Stößen durch 6 *mm* starke, kupferne Verbindungen miteinander verbunden sind.

Leitung. Die Kontaktleitung besteht aus 8 *mm* dickem Kupferdraht, welcher an einfachen, auf hölzernen Masten befestigten Gasrohrkonsolen aufgehängt ist. Die Isolation der Bahnkontaktleitung ist gegen Erde doppelt, wobei die Holzstangen nicht als Isolatoren gerechnet sind. Die ganze Kontaktleitung ist in zwei von einander unabhängige Teile, deren Speisung direkt von der Schalttafel der im Schontal befindlichen Reservestation erfolgt, zerlegt. Der gegen Berneck ziehende Strang wird von einer Verstärkungsleitung gespeist, die, so wie der Fahrdraht, 8 *mm* stark und auf denselben Masten, die die Fahrdrahtkonsolen tragen, befestigt ist. Der gegen Altstätten ziehende Strang hat keine Speiseleitung.

Rollmaterial. Dasselbe besteht gegenwärtig aus sieben Motorwagen. Der Wagenkasten hat eine äußere Länge von 5·6 *m* und eine Breite von 2·1 *m*. Die lichte Höhe desselben beträgt 2·33 *m*. Mit den

Plattformen gemessen hat der Wagen 7·5 *m* Gesamtlänge.

Das vom Kasten abnehmbare und auswechselbare Untergestell ist dem elektrischen Straßenbahnbetriebe entsprechend besonders kräftig aus Formeisen hergestellt. Um dem Wagenkasten eine solidere Unterlage zu schaffen, kamen Blatt-Tragfedern zur Anwendung, wodurch ruhiger Lauf erzielt wird. Um das Dröhnen und Vibrieren des Untergestelles abzuschwächen, sind zwischen letzterem und dem Wagenkasten Gummiplatten angeordnet. Der Radstand beträgt 2 *m*. Die Achsen und Bandagen sind aus Stahl, die Radsterne von Schmiedeeisen. An den Achsenbüchsen hängen zwei Längsträger, an welche die keilförmig angeordneten Räumerbretter, sowie vor jedem Rad eine Räumerbürste angebracht sind. Die Gestelle sind mit einer vierklötzigen, rasch wirkenden Schrauben-Spindelbremse, welche von beiden Plattformen aus bedienbar ist, versehen.

Der Wagen bietet im Innern, auf quer angeordneten Sitzen, welche von polierten Eichenholzplatten hergestellt sind, Platz für 24 Personen. Die an den beiden Stirnenden angeordneten Plattformen sind 950 *mm* lang und für sechs Stehplätze vorgesehen. Der Zutritt zum Wageninnern, das durch eine Zwischenwand in eine Raucher- und Nichtraucherabteilung getrennt ist, erfolgt durch breite Schiebetüren von der Plattform aus.

Über der ganzen Länge des Wagenkastens ist ein Ventilationsaufbau mit beweglichen Fenstern angebracht. Im Wagenfußboden, der durchweg mit einem Lattenrost belegt ist, sind zwei Klappen angeordnet, um leicht zu den Motoren gelangen zu können.

Jede Plattform hat zwei abnehmbare Abschlußtüren, welche durch einen Klinkenverschluß festgelegt werden können. An jedem Plattformdach ist eine

Signalglocke mit Riemenzug und am Plattformfußboden eine Tretglocke befestigt. An jeder Kopfwand ist eine Petroleumlampe, die zugleich als Signallampe dient und außen einen Signalapparat mit roten und grünen überklappbaren Gläsern trägt, eingesetzt. Diese Petroleumlampen sind sehr notwendig, da die Straßen nicht beleuchtet sind und bei Versagen des Stromes während der Nacht einer Panik des Publikums vorgebeugt wird. Außerdem ist jede Wagenabteilung durch an der Wagendecke befestigte Glühlampen beleuchtet. Die Heizung der Wagen, anfangs für Brikettheizung eingerichtet, erfolgt jetzt elektrisch.

In jedem Wagenkasten befinden sich zwei Sandstreuer, welche mittels Zuges von der Plattform aus bedient werden. Am Kopfende der Wagen befindet sich ein beweglicher Zentral-Kuppel- und Stoßapparat.

Die Wagen wurden von der »Vereinigten Maschinenfabrik Augsburg und Maschinenbaugesellschaft Nürnberg A.-G.« hergestellt, während die elektrische Ausrüstung von der Maschinenfabrik Örlikon besorgt wurde.

Die elektrische Ausrüstung besteht bei sechs Wagen aus je einem Motor, Typ E Z 7 von 18 PS., dessen Armatur 59 Nuten mit je zwölf Windungen von 2·2—2·8 *mm* Draht besitzt. Der Kollektor besteht aus 118 Lamellen. Die in Reihe geschalteten Magnetspulen haben je 120 Windungen von 3·5—4 *mm* Draht. Die weitere elektrische Ausrüstung der Wagen besteht aus 2 Regulierapparaten (Kontrolleur) mit gemeinsamer Kurbel und Widerstandskasten, eingerichtet für elektrische Bremsung, 2 Sicherheitsschaltern mit Bleisicherungen, 1 Stromabnahme-Vorrichtung und 6 Glühlampen mit Ausschalter und Sicherungen. Der siebente Wagen besitzt 2 Motoren, um eventuell einen Anhängewagen mitführen zu können.

Für Befahrung der ersten von zwei Haltestellen begrenzten Sektion beträgt der Fahrpreis 15 Cts., während für die Befahrung einer jeden weiteren Sektion ein Zuschlag von 5 Cts. erfolgt.

Anlagekosten. Die Kosten der gesamten Bahnanlage, jedoch ohne die Maschinen der Kraftstationen, welche 110.000 Franken kosteten, setzen sich aus folgendem zusammen:

Organisations- u. Verwaltungskosten, Vorarbeiten und Bauleitung . .	Franken	19.517·93
Verzinsung des Baukapitals . . .	»	8.898·78
Expropriationen	»	42.904·62
Unter- und Oberbau	»	199.290·83
Depot- und Werkstättengebäude, Diverses	»	50.689·12
Akkumulatoren und Leitungsnetz .	»	105.152·25
Rollmaterial	»	106.959·65
Bureaueinrichtungen, Gerätschaften Werkstätte etc.	»	12.120·09
total . .	Franken	545.533·27

Aus dieser Totalsumme ergeben sich folgende Einheitspreise:

Unter- und Oberbau per Bahnkilometer Betriebslänge	Franken	17.180·20
Akkumulatoren und Leitungsnetz per Kilometer	»	9.064·80
Totalkosten per Bahnkilometer Betriebslänge (ohne Kraftstationen) .	»	47.030·40

Erträgnis. Über die Frequenz und Rentabilität der Bahnanlage gab der Geschäftsbericht für das Jahr 1899 folgenden Aufschluß:

Zahl der beförderten Personen	430.365
Ausgeführte Wagenkilometer	151.435

Übrigens sind die übrigen Wagen so konstruiert, daß ein zweiter Motor leicht angebracht werden kann. Die Motoren selbst sitzen auf einer Vorgelegewelle und treiben die Laufachse mittels Zahnräderübersetzung an. Das Nettogewicht eines Wagens mit elektrischer Ausrüstung beträgt 6500 *kg*.

Da die Straßenbahn auch die Postbeförderung von den Bahnhöfen nach den Ortschaften, die an der Strecke liegen, besorgt, werden kleine, zweirädrige Postwagen als Anhängewagen mitgeführt.

Werkstätte. Dieselbe enthält 2 Drehbänke, 1 Schleifstein, 1 Bohrmaschine, sowie die normale Werkstätteneinrichtung. Die Maschinen werden durch 1 Gleichstrommotor betätigt.

Remise. Die für acht Wagen Raum bietende Remise ist zweigeleisig. Sie ist durchweg mit Zementbelag versehen und mit einer großen Putzgrube ausgestattet.

Fahrplan. Zur Bewältigung des Verkehres sind, der Jahreszeit entsprechend, 16 bis 21 Fahrten in jeder Richtung in der Zeit von 6 Uhr morgens bis 9 Uhr morgens festgesetzt. Die mittleren Fahrgeschwindigkeiten betragen auf der Strecke Bahnhof-Altstätten bis Altstätten 12 *km*, auf den Strecken Altstätten-Stadt bis Heerbrugg und Heerbrugg—Berneck 13·6 *km* per Stunde.

Taxen. Die ganze Linie ist in acht Taxstrecken eingeteilt und zwar:

Altstätten-Bahnhof—Altstätten-Stadt	1250 *m*
Altstätten-Stadt—Leuchingen	1400 »
Leuchingen—Marbach	1300 »
Marbach—Rebstein (Stationsstraße)	1300 »
Rebstein—Balgach-Bad	1500 »
Balgach-Bad—Balgach-Dorf	750 »
Balgach-Dorf—Heerbrugg	1700 »
Heerbrugg—Berneck	2500 »

Betriebs-Einnahmen	Franken	77.720·—
» » per Bahnkilometer . . .	»	6.758·26
» » per Wagenkilometer .	Cts.	51·3
Betriebs-Ausgaben	Franken	57.377·43
» » per Wagenkilometer . .	Cts.	37·88

Bahnanlage Meckenbeuren—Tettnang.

Tracé. Die Bahnlinie führt von Meckenbeuren aus durch ein ziemlich freies Gelände ohne irgend eine Zwischenortschaft zu berühren, so daß zwischen Meckenbeuren und Tettnang jede Station entfällt. Die Betriebslänge der Bahn beträgt 5 *km*.

Steigungsverhältnisse. Die Steigungsverhältnisse sind ziemlich ungünstig. Die Linie steigt erst allmählich mit 2%, um nach einigen Schwankungen bei 2 *km* in eine Steigung von 20% überzugehen. Diese Steigung wird, abgesehen von der Unterbrechung durch eine kurze Steigung von 15%, bis zur Station Tettnang beibehalten.

Unterbau. Derselbe ist wie bei allen deutschen Normalbahnen durchgeführt worden, ohne daß sich besondere Hindernisse in den Weg gestellt hätten oder Kunstbauten notwendig geworden wären.

Oberbau. Die Normalspur wurde in den Kurven, entsprechend den deutschen Eisenbahnvorschriften, erweitert. Der kleinste Krümmungshalbmesser beträgt 180 *m*. Er kommt allerdings nur einmal vor, fällt jedoch mit der Steigung 1 : 50 zusammen. Für den Oberbau wurde als zulässiger Raddruck 5 *t* angenommen und dementsprechend eine Stahlschiene von 22 *kg* Gewicht und 9 *m* Länge verwendet. Jede Schiene ist auf 11 kiefernen Querschwellen verlegt. Im Staatsbahnhofe Meckenbeuren, sowie im Bahnhofe Tettnang kamen je

8 Geleiseweichen zur Verlegung. Die Länge aller Haupt- und Nebengeleise beträgt 5·857 *km*.

Leitungsnetz. Die Kontaktleitung ist über der Mitte der Geleise geführt und an Stahlseilen, welche zwischen den zu beiden Seiten der Bahnlinie aufgestellten Masten verspannt sind, in einer Höhe von 6 *m* aufgehängt. In den Stahlseilen sind Porzellanisolatoren und in den Aufhängungspunkten Hartgummiisolatoren angebracht. Die Speiseleitung ist auf je 200 *m* Abstand mit der Kontaktleitung verbunden. In Meckenbeuren und in der Zentrale Tettnang ist der eine Pol der Gleichstrommaschine mit den Schienen verbunden, welche dem Strom als Rückleitung dienen. Den anderen Pol bildet die Speiseleitung. Zur Sicherung einer guten Verbindung sind die Schienen an den Stößen noch durch besondere, angenietete Kupferbügel verbunden, so daß der Ohmsche Widerstand der Schienen für das verwendete Profil nur 0·01 Ohm beträgt. Am Anfange und Ende der Linie sind Streckenausschalter eingebaut, um sowohl jeden Bahnhof, als auch die Strecke selbst ausschalten zu können. In den Staatsbahnhof Meckenbeuren ist die Kontaktleitung nur soweit eingeführt, als es die Übernahme und Übergabe der Güterwagen erfordert. Im Bahnhofe Tettnang, sowie in jenem von Meckenbeuren waren je acht Luftweichen notwendig. Für die Luftweichen war die Bedingung gestellt, daß sie mit 30 *km* Geschwindigkeit befahren werden müßten; wenn auch diese Geschwindigkeit bei Verschiebebewegungen selten vorkommt, so war eine höhere Geschwindigkeit als bei Straßenbahnweichen im Interesse einer raschen Abwickelung des Verschiebedienstes doch von Wichtigkeit.

Rollmaterial. Für die oben erwähnte ungünstige Stelle der Bahn, wo der kleinste Krümmungshalbmesser mit der größten Steigung zusammenfällt, wurden für einen vollbelasteten Zug von 43 *t* Gewicht ermäßigte

Anforderungen an die Geschwindigkeit gestellt und hierfür 10 *km* angenommen. Bei dieser Geschwindigkeit berechnet sich die erforderliche Arbeit an der ungünstigsten Stelle für den vollbelasteten Zug zu 39 PS., während auf gerader, wagrechter Strecke, bei 25 *km* Geschwindigkeit eine Arbeit von nur 12 PS. nötig wird. Der wesentlich größere Arbeitsaufwand in der Steigung ließ es wünschenswert erscheinen, das tote Gewicht der Züge tunlichst zu vermindern. Es wurde daher von der Anwendung einer eigentlichen elektrischen Lokomotive abgesehen und man entschloß sich die Personenwagen als Motorwagen auszubilden.

Das Rollmaterial besteht aus zwei Motorwagen und einem Personen-Anhängewagen III. Klasse Die Güterwagen, mit Ausnahme von zwei für den Ortsverkehr bestimmten, werden dem Wagenparke der Württembergischen Staatsbahn entnommen.

Für die Konstruktion der Motorwagen waren drei Hauptbedingungen maßgebend: 1. Die Zug- und Stoßvorrichtung, somit das ganze Untergestell, waren durch das Bedürfnis bestimmt, die Motorwagen mit allen Fahrzeugen der Hauptbahn zu kuppeln. 2. Die untere Grenze des Wagengewichtes war durch die Zugkraft bestimmt. 3. Für die innere Einteilung der Wagen war vorgeschrieben, daß dieselben Abteilungen II. und III. Klasse, sowie einen Raum für Gepäck und Post enthalten sollen.

In der Mitte des Motorwagens ist der durch seitliche Schubtüren zugängliche Gepäcksraum, in dem ein kleiner Verschlag für Poststücke eingebaut ist, angeordnet. An die Gepäcksabteilungen schließen sich beiderseits Personenabteilungen an, auf einer Seite die II. Klasse mit 11, auf der anderen die III. Klasse mit 21 Sitzplätzen. Die Personenabteilungen sind von den Plattformen an den Wagenenden durch Schubtüren zugänglich. Die Plattformen sind mit Seitentüren versehen,

so daß sie bei stärkerem Personenverkehre auch besetzt werden können. Auf der Plattform hat auch der Wagenführer seinen Platz. Das Gestell ist ohne Puffer 8800 *mm* lang. Entsprechend dieser Länge und den zu befahrenden Kurven wurde ein fester Radstand von 4500 *mm* gewählt. Die Räder sind Griffinsche Hartgußräder.

Jede der beiden Achsen wird mittels Zahnradvorgelege durch einen Motor von 25 PS., bei einer Zahnradübersetzung 58 : 144·14, angetrieben. Die mit Ringwickelung versehene Armatur der Motoren hat 59 Nuten mit je 16 Windungen von 2·5—3·1 *mm* Draht. Die Magnete haben vier in Reihe geschaltete Spulen. Jede Spule besteht aus 84 in sieben Lagen angeordneten Windungen von 5·6—6 *mm* Draht. Der Kollektor besitzt 118 Lamellen. Die beiden Motoren arbeiten in Reihenschaltung. Ein auf dem Wagen angebrachtes, federndes Drehgestell drückt das die Bronzerolle tragende Stahlrohr gegen die Kontaktleitung. Der Strom passiert Notausschalter, Bleisicherung, Blitzschutzapparat, sowie einen Regulator, welcher mittels Drehung einer Kurbel gestattet, die Geschwindigkeit innerhalb weiter Grenzen zu verändern. Regulator und Handbremse sind auf den Plattformen angebracht.

Die Wagen werden durch sechs hintereinander geschaltete Glühlampen beleuchtet, außerdem sind in die Stirnwände zwei Petroleumlampen eingebaut. Sämtliche Wagen sind elektrisch geheizt.

Das Totalgewicht eines Motorwagens beträgt 13·8 *t*, jenes eines Anhängewagens 9·3 *t*.

Die vertragliche Leistung eines Motorwagens ist auf eine Zugkraft von 350 *kg* bei 30 *km* oder 1200 *kg* bei 8 *km* (letzteres für Güterzüge) festgesetzt. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die Motoren eine bedeutend höhere Leistung entwickeln, da selbst bei größerer Geschwindigkeit Lastzüge von 55 *t* befördert werden.

Im nachfolgenden sei noch eine Tabelle der verschiedenen Geschwindigkeiten bei verschiedener Belastung und günstigstem Wirkungsgrade der Motoren gegeben.

Zusammensetzung	Gewicht in Tonnen	Fahrzeit in Minuten	Kilometer pro Stunde auf Steigungen			
			im Mittel	1 : 500	1 : 200	1 : 50
Motorwagen allein	13·8	12	22	29	24	19
Motorwagen mit Anhängewagen .	33	18	15	24	18	14
Motorwagen mit Anhängewagen .	46·4	21	13	22	15	10·5

Betrieb. Der Fahrplan wurde so festgelegt, daß an jeden in der Station Meckenbeuren haltenden Staatsbahnzug Anschluß stattfindet.

Betriebspersonal. Dasselbe besteht aus: 1 Betriebsleiter, 1 Obermaschinisten, 1 Expedienten, 1 Aspiranten, 1 Stationsdiener, 1 Lademeister, 1 Weichensteller, 1 Kolonnenführer, 1 Motorwagenführer, 1 Zugführer, 1 Schuppenwärter, 1 Turbinenwärter, 1 Turbinenablöswärter, total 13, per Bahnkilometer 2·60 Personen.

Betriebsergebnisse. Im Jahre 1899 wurden befördert: 81·611 Personen, wovon 5·38% auf die II. Klasse und 94·62% auf die III. Klasse entfielen.

Die totale Leistung betrug im Jahre 1899: 49.540 Nutzkilometer, 147.090 Wagenkilometer, 9912 total gefahrene Züge, 27·16 per Tag gefahrene Züge.

Die Betriebseinnahmen ergaben aus dem

Gesamtverkehr:

auf 1 Bahnkilometer . . . *M.* 12.412·08
» 1 Nutzkilometer . . . » 125·27

Personenverkehr:
auf 1 Personenkilometer . . . *M.* 4·52

Güterverkehr:
auf 1 Tonnenkilometer . . . *M.* 23·68
Betriebseröffnung am 4. Dezember 1895.

Straßenbahn in Freiburg (Schweiz).

Gebäude. Die in Steinbau ausgeführte Kraftzentrale liegt im Zentrum der Stadt am Notre-Dame-Platz zwischen den beiden Kirchen Notre Dame und Cordeliers. Das Gebäude bedeckt eine Grundfläche von 568 m^2. Im Erdgeschoß befindet sich der Raum für die Umformergruppe und die Apparatenanlage (79·5 m^2), von demselben durch eine Glaswand getrennt, die Werkstätte (88 m^2) und die Remise (330 m^2). Im Souterrain sind das Dienstzimmer und der Akkumulatorenraum untergebracht.

Die Remise ist mit vier Geleisesträngen und zwei Putzgruben versehen. Ein Geleisestrang führt in die Werkstätte. Sämtliche vier Geleisestränge laufen vor dem Gebäude auf dem Notre Dame-Platz zu einer Drehscheibe, von welcher ein 89·8 *m* langer Verbindungsstrang zur Hauptlinie führt. Die Remise erhält reichliches Licht durch große Oberlichter. Der Dachstuhl ruht auf eisernen Säulen, die zwischen den Geleisen angeordnet sind.

Umformergruppe. Dieselbe besteht aus einem Gleichstrom-Nebenschlußmotor, welcher mit einer Gleichstrom-Nebenschlußdynamo mittels isolierender und flexibler Kuppelung gekuppelt ist.

Der Gleichstrom-Nebenschlußmotor, welcher bei 400 Umdrehungen in der Minute 85 PS. leistet, wird von dem Verteilungsnetze der Administration des Eaux et Forets gespeist. Der Durchmesser des Armatureisens beträgt 745 *mm*, die Eisenbreite 330 *mm*. Die

Armatur besitzt 242 Nuten von 4·6—28 *mm*. In jeder Nut sind 2 Leiter von $\frac{2\times 10}{3\times 11}$ *mm* Kupferstab in 4 Ebenen übereinander gewickelt. Der Kollektor hat 42 Lamellen. Die Bohrung der Magnete beträgt 759 *mm*. Die 6 Magnetspulen sind in Reihe geschaltet. Jede Magnetspule besteht aus 3500 Windungen von 1·8—2·2 *mm* Draht.

Die Leistung von 85 PS. wird derzeit noch nicht ausgenützt, doch wurde mit Rücksicht auf eine spätere Vergrößerung, von vornherein ein stärkerer Motor vorgesehen. Die zum Motor führende Leitung zweigt direkt von der Schaltanlage der hydroelektrischen Zentrale »Du Barrage« ab.

Die Gleichstromdynamo hat eine Aufnahmefähigkeit von 85 PS. und erzeugt bei 400 Umdrehungen in der Minute einen Strom von 575 Volt und 110 Ampère. Die Armatur hat einen Eisendurchmesser von 745 *mm*, eine Eisenbreite von 330 *mm*, und besitzt 200 Nuten von 6—24 *mm*. Jede Nut enthält 2 Leiter von $\frac{3\times 8}{4\times 9}$ *mm* Kupferstab in 4 Ebenen übereinander gewickelt. Der Kollektor hat 200 Lamellen. Die Bohrung der Magnete beträgt 759 *mm*. Die in Reihe geschalteten Erregerspulen bestehen aus je 2000 Windungen von 2·0—2·4 *mm* Draht.

Motor und Generator sind sorgfältig gegen Erde isoliert. Sie arbeiten selbst bei einer fortwährenden Überlastung von 20% funkenlos und ohne höhere Erwärmung irgend eines Teiles als 30% über die Außentemperatur.

Apparatanlage. Dieselbe ist auf einem Eisengerüste montiert und in einer Kasten-Holzverschalung untergebracht. Die aus weißem Marmor hergestellte Verkleidung ist in fünf Felder eingeteilt. Das 1. Feld trägt einen automatischen Ausschalter für die Luftlinie; das

2., 3. und 4. Feld je einen Ampèremeter, Voltmeter, Hauptausschalter für Motor, Generator und Batterie; das 2. Feld außerdem noch den Anlaßapparat für den Motor; das 3. Feld die Reguliervorrichtung für den Generator, das 5. Feld je zwei Handausschalter für je eine Batteriehälfte, sowie einen automatischen Batterieausschalter, durch welchen der Strom unterbrochen werden kann, wenn aus irgend einer Ursache die Spannung der Batterie jene des Generators, übersteigt. Hierdurch kann jede Unterbrechung im Gange des Generators hervorgerufen durch Umkehrung des Stromes, vermieden werden. Am oberen Teile desselben Feldes befindet sich noch ein Handzellenschalter, welcher gestattet, die Spannung in der Kontaktleitung durch Zu- oder Abschaltung einiger Elemente, konstant zu erhalten. Im Schaltraum befinden sich ein Anlaßapparat und zwei Regulierwiderstände, von denen der eine für die Regulierung der Erregung des Motors, der andere für jene des Generators dient. Sämtliche Sicherungen sind in einem an der äußeren Wand befindlichen Porzellankasten untergebracht. Die Blitzschutzvorrichtungen der von der Kraftzentrale kommenden Hochspannungsleitung und jene für die Speiseleitung, sind an den Wänden der Maschinenhalle befestigt.

Batterie. Dieselbe besteht aus 270 Elementen mit einer Kapazität von 132 Ampèrestunden und einer Entladungsstärke von 132 Ampère.

Tracé. Es sind zwei Betriebsstationen vorhanden: Pont-suspendu—Bahnhof—Pérolles mit gemeinsamer Strecke Pont-suspendu—Bahnhof. Erstere Linie hat eine Länge von 1825·45 *m*, letztere von 2452·55 *m*. Die gemeinsame Strecke ist 1216·25 *m* lang. Die totale Länge des Netzes ist 3061·75 *m*. Die Gesamtlänge der Weichen beträgt 340 *m*. Hierzu kommt noch der früher erwähnte Verbindungsstrang, der zur Remise führt. Die größte

Steigung befindet sich in der Rue de Lausanne und beträgt 10·17%.

Unterbau. In der Stadt, wo sich fester Boden vorfindet, besteht der Unterbau aus einer Schicht Beton, in welche das eiserne Tragband für die Schiene eingelassen ist. Mit Ausnahme einer Trockenlegung des Bodens an einigen Stellen, sind keine besonderen Unterbauarbeiten ausgeführt worden. Es waren auch keine Veränderungen und Verbesserungen der vorhandenen Straßen notwendig.

Oberbau. Auf dem oben erwähnten Tragbande ruht die Schiene, System Demerbe, auf. Die untere Höhlung der Schienen ist mit Beton ausgefüllt. Es hat sich nach jahrelangem Betriebe gezeigt, daß dieser Betonausguß den Hohlraum der Schienen gut ausfüllt und mit dem früher erwähnten Betonunterbau ein Stück bildet. Auf der Strecke Pont-suspendu—Bahnhof, die seit vier Jahren schon im Betriebe ist, hat bis heute keine einzige Senkung stattgefunden. Zwischen den Tragbändern und Schienen, sowie zu beiden Seiten der letzteren, ist eine Steinpflasterung angeordnet.

Die Spurweite der Geleise beträgt 1 *m*, der kleinste Krümmungsradius 25 *m*. Der Krümmungsradius der Weichen beträgt 50 *m*. Es kamen zwei Profile Demerbe-Schienen zur Anwendung. Auf der Stadtstrecke wurde eine Schiene von 37 *kg* per laufenden Meter, auf den Strecken Bahnhof—Pérolles und Bahnhof—Beauregards eine Schiene von 33 *kg* per laufenden Meter verlegt. Für die erstere Strecke wiegt die totale Geleiseanlage 89·383 *kg* pro Kilometer, für die zweite 78·920 *kg* pro Kilometer. Die elektrische Verbindung der Schienstöße erfolgte durch einen gut vernieteten 8 *mm* Kupferdraht. In der Rue de Lausanne wurden zu beiden Seiten des Geleises in den Beton Holzbalken eingelassen, um für die Hemmschuhe eine gute

Reibungsfläche zu erhalten. Die elf Weichen sind mit beweglichen Doppelzungen versehen.

Auf der Linie Pérolles — Bahnhof, welche auf einer neuen Straße gelegen ist, wurde gegen Zerreißen der Betonunterlage, bei einer etwaigen Senkung der Straße, dadurch Vorsorge getroffen, daß unter der Betonunterlage Eichenplatten verlegt wurden. Falls nun stellenweise Senkungen eintreten, so wird der ganze Unterbau mit den Holzplatten gehoben und unter letzteren eine entsprechende Kieslage geschoben.

Leitungsnetz. Der Kontaktdraht, welcher einen Durchmesser von 8 *mm* hat, ist 6 *m* über die Schienenoberkante verlegt. Die Gesamtlänge des Kontaktdrahtes beträgt 4012 *m*, sein Gewicht 1793 *kg*. Die aus Stahl gefertigten Abspanndrähte sind teils an den Gebäudemauern mittels Mauerrosetten, teils an hölzernen und eisernen Masten befestigt. Die Zahl der Holzmasten beträgt 80, jene der eisernen Masten (nur in der Stadt befindlich) 17, die Zahl der Mauerrosetten 113. Die kleinste Abspannung beträgt 6·5 *m* (Rue de Lausanne), die größte 24 *m* (Avenue de Pérolles).

Eine besondere Merkwürdigkeit ist die Aufhängung des Kontaktdrahtes an den Tragseilen der Hängebrücke. Die Unterführung beim Bahnhofe besteht aus doppelt isolierten Winkeleisen, an welchen der Kontaktdraht aufgehängt ist. Sämtliche Muttern und Unterlagscheiben sind durch Fiberplättchen isoliert. Die ganze Tragvorrichtung ist gegen die Brückenkonstruktion durch Holz abgedeckt. Die Rückleitung des Stromes erfolgt durch die Schienen.

Rollmaterial. Der Wagenpark besteht aus 4 Wagen älterer und 2 Wagen neuerer Konstruktion. Durch die Regulierapparate (System Serie-Parallel), welche mit den notwendigen Vorschalt- und Bremswiderständen ausgerüstet sind, werden die beiden 20-PS.-Motoren zum Anfahren und für langsame Fahrt in Reihe, für

schnelle Fahrt und für große Kraftleistungen parallel geschaltet. Die gleichen Schalter können für Vor- und Rückwärtsgang benutzt werden. Es sind sieben verschiedene Regulierstufen und vier Bremsstufen vorhanden. Ferner ist ein besonderer Schalter, mittels welchen man den einen Motor ganz ausschalten und den anderen mit einem Teil des Regulierwiderstandes arbeiten lassen kann, vorgesehen. Ein elektromagnetischer Funkenlöscher unterbricht die Funken, welche bei Kontaktunterbrechungen entstehen können. Die Stromabnahme erfolgt mittels einer Kontaktschleifvorrichtung.

Die Wagen der Type 1897 enthalten 28 Plätze, wovon 14 Sitzplätze, 8 Stehplätze auf der hinteren und 6 auf der vorderen Plattform sind. Die Wagen der Type 1900 haben 12 Sitzplätze, 9 Stehplätze auf der hinteren und 7 auf der vorderen Plattform, zusammen ebenfalls 28 Plätze. Der Radstand beträgt 1·55 *m*. Die Spindelbremse betätigt 8 Klötze. Ferner ist eine Sicherheitsbremse spezieller Konstruktion und eine elektrische Bremse vorgesehen. Die Sicherheitsbremse besteht aus zwei Stahlklötzen (Hemmschuhen), welche mit Zähnen versehen sind. Die Bremse wird mittels Fußtrittes vom Wagenführer betätigt. Der Hebel, an dem der Fußtritt befestigt ist, löst zwei starke Federn aus, wodurch die Stahlklötze an den früher erwähnten Holzbalken eingreifen. Die Versuche ergaben, daß durch diese Bremse ein 9 Tonnen schwerer Wagen, der mit einer Geschwindigkeit von 8 *km* pro Stunde auf einem Gefälle von 10·17% fuhr, auf einer Länge von 0·8 *m* aufgehalten werden konnte.

Fahrplan. Es sind vier Wagen zum vollen Betriebe nötig. Die Wagen fahren in Zeitintervallen von $7^1/_2$ Minuten von Pont-suspendu abwechselnd nach Pérolles oder Beauregard ab, so daß auf der Strecke Pont suspendu—Bahnhof $7^1/_2$-Minuten-Betrieb, auf den anderen

Strecken 15-Minuten-Betrieb stattfindet. Von 7—8 Uhr morgens, $12^1/_2$—$1^1/_2$ Uhr mittags und 9—10 Uhr 40 Minuten abends sind nur 2 Wagen im Betrieb.

Betriebspersonal. Dasselbe besteht aus einem Depotchef, seinem Stellvertreter, 2 Arbeitern für die Zentrale, 6 Kondukteuren, 6 Wagenführern und 1 Streckenwärter.

Taxen. Die Taxen betragen je nach der Strecke 10 bis 15 Cts. Außerdem werden Abonnements und Couponhefte mit 20% Ermäßigung ausgegeben.

Anlagekosten. Dieselben betrugen Ende 1900 378,261.47 Fr. Zu dieser Zeit besaß die Gesellschaft einen Erneuerungsfond von 9000 Fr. und einen Reservefond von 11.000 Fr. Die ausgezahlte Dividende (Aktienkapital 200.000 Fr.) betrug 1897 und 1898 je 4%, 1899 und 1900 je 3%.

Schwebebahnen.

Der immer mehr zunehmende Verkehr unserer großen Städte und das Verlangen nach schneller Beförderung, hat zu der Überzeugung geführt, daß die Straßenbahnen an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit angekommen sind und man auf andere Mittel sinnen muß, den schnellen Verkehr der Massen zu fördern. Hierzu gibt es zwei Mittel, entweder unter der Erde Tunnelbahnen, beziehungsweise Unterpflasterbahnen anzulegen oder Hochbahnen zu bauen. Die Tunnelbahnen oder Unterpflasterbahnen sind sehr kostspielig und mitunter kaum ausführbar, die Hochbahnen beschränken das Straßenland und erfordern unter Umständen kostspielige Landankäufe. Man hat daher, um diesen Übelständen abzuhelfen, zu den sogenannten Schwebebahnen gegriffen, bei denen nur einzelne Tragpfeiler in gewissen Abständen erforderlich sind, während im übrigen die Geleiseanlagen auf diesen

Unterstützungen frei schwebend angeordnet werden und die Wagen an den Geleisen nach unten hängen. Eine derartige Schwebebahn ist z. B. zwischen Barmen-Elberfeld und Vohwinkel ausgeführt worden.

Die engen, bereits von Straßenbahnen mehrfach durchzogenen und verkehrsreichen Straßen dieser Ortschaften gestatteten auf keinem anderen Wege den

Fig 121. Schwebebahn.

Schnellverkehr zu vermitteln, als über dem Wuppertal in nicht zu großen Abständen einzelne Joche aus Eisenkonstruktion zu errichten, an denen die Fahrschienen befestigt sind, Fig. 121. Die Wagen bilden verhältnismäßig lange und schmale Kästen, welche an den Laufrädern, die durch Elektromotoren getrieben werden, hängen, Fig. 122. Die Einrichtung ist derartig getroffen, daß Entgleisen oder Herabfallen der Wagen unmöglich ist, es sei denn, daß die ganze

Konstruktion zusammenbrechen müßte. Auch hat sich gezeigt, daß man Kurven sehr viel leichter und schneller durchfahren kann, als auf zweigeleisigen Flachbahnen. Die einzelnen Einrichtungen einer solchen Schwebebahn sind nachstehend beschrieben.

Da das Wuppertal von etwa 300.000 Seelen bewohnt ist und an einzelnen Teilen nur bis 500 *m*

Fig. 122. Schwebebahn.

Breite hat, so wurde die am 1. März 1901 eröffnete Teilstrecke von 4·5 *km* Länge von Elberfeld bis zum zoologischen Garten mit Genugtuung begrüßt. Am 24. Mai desselben Jahres konnte bereits die Verlängerung bis Vohwinkel eröffnet werden. Im Laufe des Jahres 1902 wurde die Strecke von 5 *km* Länge nach Barmen fertiggestellt, so daß jetzt die gesamte Länge 13·3 *km* beträgt; hiervon liegen 3 *km* in den Straßen, der Rest über dem Wuppertal. Die Anlage stellt also eine zweigeleisige Hochbahn nach dem einschienigen

Schwebebahnsystem von Eugen Langen dar, welcher bereits im Jahre 1893 auf den Fabrikshöfen von van der Zypen und Charlier in Deutz eine Versuchsstrecke gebaut hatte, es ist später auch eine Bergbahn nach ähnlichem System in Loschwitz bei Dresden errichtet worden und seit dem Mai 1901 in Betrieb.

Da jedes Geleise nur eine Schiene erfordert, wurde die ganze Tragkonstruktion außerordentlich vereinfacht und die Herstellungskosten verringert. Die Stützentfernung der Joche beträgt 33 *m*, das Eisengewicht auf 1 *m* Viadukt ist etwa 1100 *kg*. Die Hauptgeleise haben auf freier Strecke Krümmungen von 75 *m* Halbmesser in der Nähe von Bahnhöfen von 30 *m* und in Nebengeleisen sogar von 8 *m* Krümmungshalbmesser. Die Erfahrungen des bisherigen Betriebes bestätigen vollauf die Vorteile und Annehmlichkeiten dieses Systems. Der Stromverbrauch der Wagen ist verhältnismäßig niedrig, was sich durch geringe Reibungsarbeit der Fahrzeuge erklärt. Die Wagen haben 50 Sitz- und Stehplätze, wiegen 5 Tonnen in besetztem Zustande und fahren in Abständen von 4 Minuten. Die zugelassene höchste Geschwindigkeit ist 30 *km* in der Stunde, man beabsichtigt jedoch demnächst auch schneller zu fahren.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß die Schwebebahnen sich möglicherweise als Schnellbahnen der Zukunft ausbilden lassen, so daß man mit Geschwindigkeiten von 200—250 *km* die Stunde vielleicht später fahren kann.

Die elektrische Hoch- und Untergrundbahn von Siemens & Halske in Berlin.

Schon zu Zeiten, als die die nördlichen Stadtteile Berlins durchziehende Stadtbahn vom Schlesischen Bahnhof nach Charlottenburg im Bau begriffen war,

plante der verstorbene Herr Dr. Werner Siemens, eine elektrische Hochbahn zu bauen, welche hauptsächlich den Süden der Stadt mit der Stadtbahn in Verbindung bringen sollte. Dieses Projekt hat im Laufe der Jahre durch verschiedene Verhältnisse und Wünsche von Behörden zahlreiche Wandlungen durchgemacht und ist nunmehr, wenn auch in veränderter Form, seiner Vollendung nahegerückt. Die Firma Siemens & Halske hat im Osten, an der Stadtbahnhaltestelle »Warschauerbrücke« beginnend, eine Hochbahn erbaut, welche über die Oberbaumbrücke (Fig. 123) durch die Skalitzer- und Gitschinerstraße, am Görlitzer Bahnhof vorbei nach dem Halleschen Tor führt, von hier aus den Landwehrkanal (Fig. 124) verfolgt und nach Überschreitung der Anhaltischen Bahn einesteils nach dem Potsdamer Bahnhof und anderseits, die Geleise der Potsdamer Bahn überschreitend, durch die Bülowstraße nach dem Nollendorfplatz sich verzweigt. Hinter diesem Platz senkt sie sich in einer Rampe nach der Untergrundbahn herab, die als Unterpflasterbahn (Fig. 125) bei der Kaiser-Wilhelm-Gedächtniskirche vorbei, unter dem Bahnhof Zoologischer Garten hindurch durch die Hardenbergstraße führt und nach dem Innern Charlottenburgs hinein fortgesetzt werden soll. Außerdem ist die Hochbahn von der Warschauer Brücke bis zum Städtischen Viehhof als Flachbahn verlängert worden.

Die Kraftstation der Hochbahn (Fig. 126) liegt an der Trebbinerstraße, etwa in der Mitte der ganzen Strecke. Abweichend von der bisherigen Bauweise solcher Hochbahnen, die besonders in Nordamerika, in New York und Chicago, einen ganz nüchternen oder auch geradezu unästhetischen Charakter zeigen, hat die Firma Siemens & Halske erste Kräfte herangezogen, um sowohl die einzelnen Strecken der

Hochbahn, als insbesondere auch die Haltestellen und Bahnhöfe möglichst architektonisch schön zu gestalten.

In der Nähe der Kraftstation ist zur Verbindung der verschiedenen, hier zusammentreffenden Richtungen, nämlich vom Halleschen Tor her, vom Potsdamer Bahnhof und von der Bülowstraße her ein Anschlußdreieck (Fig. 127) ausgebildet und zwar in der Weise, daß die von drei Richtungen hier zusammentreffenden Doppelgeleise durch Führung in verschiedener Höhe derartig verlaufen, daß keine Niveaukreuzungen stattfinden, wodurch Behinderungen und Gefahren im Betriebe vermieden werden und die ganze Bahnunternehmung eine größere Leistungsfähigkeit erhält. Die Züge können demnach ungehindert vom Halleschen Tor nach dem Potsdamer Bahnhof oder nach dem Nollendorfplatz fahren und anderseits vom Potsdamer Bahnhof sowohl, als vom Nollendorfplatz aus gleichfalls nach beiden Richtungen hin ungehindert die Endpunkte der Bahn erreichen. Neben den Geleisen der Potsdamer- und der Ringbahn senkt sich die Hochbahn, beim Anschlußdreieck beginnend, allmählich herab und endigt vorläufig am Potsdamerplatz in einer Untergrundstrecke, welche derartig ausgebaut ist, daß von hier aus später eine Fortsetzung der Unterpflasterbahn nach dem Innern der Stadt stattfinden kann. Der hier gelegene vorläufige Endbahnhof hat ein Auszuggeleise zum Umsetzen der ankommenden Züge und zwei Aufstellungsgeleise, zur Unterbringung von Reservezügen. Der Wagenschuppen und die Betriebswerkstätte befinden sich auf den Hochbahnanlagen an der Warschauerbrücke, ein zweiter Wagenschuppen ist in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Anschlußdreieck erbaut.

Die Hochbahn ist im allgemeinen aus Eisen konstruiert und ruht meistens auch auf eisernen Pfeilern.

Nur in der Bülowstraße und auf dem Nollendorfplatz hat man teilweise steinerne Pfeiler zur Anwendung gebracht. Von dem Geleisedreieck in der Nähe des Potsdamer Bahnhofes führt eine Brücke von bedeutender Spannweite über die Geleise des Potsdamer Außenbahnhofes, die insofern interessant ist, als mit Rücksicht auf etwaige Veränderungen in den Staatsbahngeleisen die Brücke in der Mitte ein verschiebbares Joch hat, so daß ohne große Veränderungen je nach Bedarf das Joch nach der einen oder anderen Seite um eine gewisse Strecke verschoben werden kann. Kurz hinter dieser Bahnüberschreitung durchzieht die Hochbahn ein Haus am Dennewitzplatz (Fig. 128), welches zu diesem Zwecke durchbrochen und umgebaut wurde.[1])

Die Untergrundstrecken sind als Unterpflasterbahnen ausgebildet und liegen großenteils mit der Tunnelsohle etwa 3 *m* unter dem Grundwasserspiegel. Um die Sohle und Seitenwandungen des Tunnels aus Beton im Trockenen herstellen und durch eine dreifache Schicht von Asphaltpappe zur späteren Abhaltung des Grundwassers abdichten zu können, mußte das Grundwasser während des Baues durch Pumpwerke bis zur Sohle des Tunnels gesenkt werden. Auf den Seitenwänden des Betonmauerwerks ruhen eiserne Träger, welche mit flachen Betonkappen eingewölbt sind.

In dem Kraftwerk an der Trebbinerstraße sind zunächst drei Dampfdynamos (Siemenssche Innenpolmaschinen) von je 900 PS. normaler Leistung aufgestellt. Die Normalspannung am Schaltbrett beträgt etwa 750 Volt. Die Maschinen leisten jede über 1000 Ampère. Es ist Raum für zwei weitere Maschinen

[1]) Nach »Elektrot. Mitteilungen«, 1901, Heft 8. — Ausführliche Abbildungen und Beschreibungen findet man in Bd. 46 der »Zeitschrift d. Ver. Deutscher Ingenieure«, sowie in der »Deutschen Bauzeitung«, 1901.

von je 1300 PS. vorgesehen und kann das Maschinenhaus durch Ankauf des Nachbargrundstückes noch um zwei weitere Maschinensätze von je 2500 PS. erweitert werden.

Die Stromzuführung für die fahrenden Züge geschieht durch die seitlich neben den Geleisen verlegte Kontaktschiene, während zur Rückleitung die Fahrschienen dienen. Die Geleise sind auf imprägnierten Holzschwellen verlegt, die in den Gefällestrecken noch besonders gegen etwaiges Wandern gesichert sind. Um das störende Geräusch, wie es andere Hochbahnen haben, beim Fahren der Züge zu vermeiden, sind die Holzschwellen zum Teile direkt in ein Schotterbett gelagert, zum andern Teil auf eisernen Querträgern des Viaduktes, wobei zwecks Schalldämpfung auf den zwischen den Querträgern gespannten Tonnenblechen eine aus Bimsbeton hergestellte Decke mit darauflagernder Kiesschüttung zur Anwendung gelangte. Außerdem ist der übliche stumpfe Stoß der Fahrschienen durchaus vermieden. Durch den angewendeten, kontinuierlich wirkenden Wechselsteg-Verblattstoß wird, wie Versuche bereits gezeigt haben, ein äußerst sanftes und tunlichst geräuschloses Fahren erreicht. Die Bahnsteige liegen in der Höhe des Fußbodens der Wagen, so daß Ein- und Aussteigen schnell und ohne Störung von statten gehen können.

Die Franz Josef-Elektrische Untergrundbahn.

Ein wesentliches Glied in der Kette der elektrischen Bahnen in Budapest bildet seit 1896 die Franz-Josef-Elektrische Untergrundbahn.

Die Herstellung einer Straßenbahn aus dem Innern der Stadt nach dem Stadtwäldchen unter Benützung der Andrássystraße ist seit der Fertigstellung dieser Straße wiederholt erörtert worden und bildete schon

vor mehr als zehn Jahren den Gegenstand amtlicher Verhandlungen.

Der ursprüngliche Plan, eine Pferdebahn in der Andrássystraße zu erbauen, wurde schon im Jahre 1882 von dem Minister abgelehnt und damit ein für alle Mal aufgegeben.[1])

Erst mehrere Jahre später, nach dem günstigen Erfolge der von der Siemens & Halske Aktiengesellschaft seit 1887 in Budapest ausgeführten und betriebenen elektrischen Bahnen mit unterirdischer Stromleitung trat man wieder dem Unternehmen näher, in der Andrássystraße eine Bahn zu bauen und zwar eine elektrische Straßenbahn mit unterirdischer Stromzuführung.

Die Budapester Elektrische Stadtbahn A.-G. und die Budapester Straßeneisenbahn-Gesellschaft überreichten am 18. Februar 1893 in einer gemeinschaftlichen Eingabe den Behörden einen derartigen Entwurf. Obwohl der Gemeinderat und der Magistrat denselben günstig aufnahmen, wurde auch dieser Entwurf einer elektrischen Bahn vom hauptstädtischen Baurat und vom Minister des Innern abgelehnt und zwar seitens des letzteren mit der Begründung:

»Die Andrássystraße sei schon ursprünglich derart geplant, daß die Herstellung einer Straßenbahn als ausgeschlossen betrachtet werden müsse. Die Andrássystraße habe sich, den Absichten ihres Schöpfers entsprechend, zu einer Lieblingspromenade der Bevölkerung entwickelt; übrigens nehmen nicht nur der Wagenverkehr, sondern auch der Fußgängerverkehr zeitweise solchen stets wachsenden Umfang an, daß es schon derzeit, besonders bei dem Endpunkte der Straße und vor dem Opernhause, Schwierigkeiten verursache, welche in unerträglicher Weise gesteigert werden

[1]) Nach »Elektrotechnischer Zeitschrift« 1897. Heft 36. Vortrag des Reg.-Baumeisters Braun.

würden, wenn noch ein Straßenbahnverkehr hinzukäme.« Zum Schlusse erklärte der Minister in seinem Erlasse, daß der Plan einer Straßenbahn auf der Andrássystraße als endgültig abgelehnt zu betrachten sei.

Nach dieser Entscheidung mußte die elektrische Straßenbahn in der Andrássystraße aufgegeben werden.

Dies hatte zur Folge, daß sich jetzt die beiden Straßenbahn-Gesellschaften mit einem von der Siemens & Halske Aktiengesellschaft ausgearbeiteten Entwurf einer Untergrundbahn befaßten, welche vom Gisela-platz ausgehend, unter dem Waitzner-Ring und unter der Andrássystraße entlang nach dem Stadtwäldchen führen sollte, und am 2. Jänner 1894 den Entwurf dieser Untergrundbahn bei den Gemeindebehörden einreichten.

Da die elektrische Untergrundbahn im Falle ihrer Genehmigung unter allen Umständen bis zur Millenniumsausstellung im Jahre 1896 fertiggestellt werden sollte, war eine Beschleunigung der Verhandlungen und eine rasche Erledigung aller Eingaben dringend notwendig.

Es ist dem überaus entgegenkommenden Verhalten der zuständigen Behörden zu danken, daß schon am 13. August 1894 der Bau der Bahn in Angriff genommen werden konnte.

Die nachstehenden Angaben zeigen, in welcher raschen Folge diese Angelegenheit seitens der Behörden erledigt wurde:

Das Unternehmen wurde bei der Stadtgemeinde am 12. April 1894 in der Eisenbahnkommission, am 18. April in der Finanzkommission und am 25. April im Gemeinderat selbst behandelt und genehmigt. Dann wurde der Entwurf im hauptstädtischen Baurate am 2. Mai beraten. Hierauf fand am 15. Mai auf Grund der eingereichten Pläne die administrative Begehung der Bahn statt und am 30. Mai im königlich unga-

rischen Handelsministerium die Konzessionsverhandlung. Am 9. August 1894 erfolgte die Konzession.

Außerdem wurde behufs raschester Erledigung aller den Bau der Untergrundbahn betreffenden Angelegenheiten seitens des Handelsministers eine gemischte Kommission eingesetzt, deren Aufgabe darin bestand, die beschleunigte Ausgabe der behördlichen Genehmigungen vorzubereiten und die Bauausführung, sowie die richtige Einhaltung der festgesetzten Frist zu überwachen.

Die elektrische Untergrundbahn beginnt im Innern der Stadt in der Nähe des Donaukais, unter der Redoutengasse und führt unter dem Giselaplatz, unter der Dreißigstraße, unter dem Franz Deák-Platze und dem Waitzner-Ring entlang bis zum Beginn der Andrássystraße; ferner unter der ganzen Andrássystraße entlang bis zum Stadtwäldchen als Unterpflasterbahn, steigt dann an die Oberfläche hinauf und endigt im Stadtwäldchen in der Nähe des Artesischen Bades.

Sie hat bei 3700 *m* Länge, elf Haltestellen, an welchen die Fahrgäste aufgenommen und abgesetzt werden können. Sie ist außerdem nicht als Tunnel, wie die Stadtbahn in London, ausgeführt, sondern als sogenannte Unterpflasterbahn mit flacher, unmittelbar unter dem Pflaster liegender Decke. Von den Haltestellen liegen neun unter dem Straßenpflaster im Tunnel, zwei dagegen sind in der Oberfläche des Stadtwäldchens ausgeführt.

Von der einen Haltestelle im Stadtwäldchen aus besitzt die Untergrundbahn in Straßenhöhe eine Geleisverbindung mit ihrem Betriebsbahnhofe in der Arenastraße, woselbst ein Reinigungsschuppen zur Reinigung und Instandhaltung der Wagen errichtet ist.

Die Untergrundbahn hat die normale Spurweite von 1435 *mm* erhalten; ihre größte Steigung beträgt $20^0/_{00}$, der kleinste Krümmungshalbmesser 40 *cm*.

Der Querschnitt des Tunnels ist zweiteilig, indem zwischen den beiden Geleisen eine Säulenreihe steht. Dem entsprechend besteht die Sohle des Tunnels aus zwei nebeneinander sich erstreckenden Sohlengewölben mit dazwischen liegendem durchlaufendem Unterbau für die Säulenreihe. Die beiden senkrechten Seitenwände sind je 1 *m* stark und in ihrem oberen Teile allmählich auf 0·65 *m* abgeschwächt. Die Decke ist wagerecht aus Walzeisen und dazwischen eingebauten Kappen hergestellt. Der Tunnel hat eine lichte Weite von 6 *m* und eine lichte Höhe von 2·75 *m*. Das Maß für die Höhe wurde durch die Lage des Hauptrezipienten auf der großen Ringstraße am Oktogonplatz bedingt, welcher von der Untergrundbahn überfahren wird.

In den Stationen der Stadtbahn sind entsprechende Erweiterungen des Tunnelquerschnittes bis zu 6·8 *m* Breite ausgeführt.

Der erste Aushub fand in der Weise statt, daß der Tunnel in seiner ganzen Breite gleichzeitig ausgeschachtet wurde. Alsdann wurden zuerst die Seitenwände und hierauf die Sohle des Tunnels ausschließlich aus Beton hergestellt. Hierauf wurde die Decke ausgeführt.

Die große Breite der Andrássystraße gestattete die Ausführung des Tunnels im Tagebau, da neben der Baugrube für den Tunnel noch eine genügende Straßenbreite für den übrigen Straßenverkehr verbleiben konnte.

Wäre dies nicht der Fall gewesen, so würde man in folgender Weise vorgegangen sein:

Man hätte zuerst die beiden Tunnelwände nacheinander im Tagebau ausgeführt, während der Tunnelkern und die Sohle schließlich unter der fertigen Decke ausgehoben und das Sohlengewölbe zum Schluß zwischen beiden Tunnelwänden eingespannt worden

wäre. Das Einbauen der Tunnelstrecke würde dann auf solchen Strecken, wo am Tage der Verkehr nicht eingeschränkt werden darf, stückweise des Nachts erfolgen, derart, daß der Verkehr am Tage auf einer vorläufigen Abdeckung mit einem Bohlenbelag wieder hinübergeleitet werden kann.

Auf diese Weise wurde bei der Ausführung der Untergrundbahn in Glasgow unter Anwendung elektrisch betriebener Pumpwerke verfahren. Dieser Vorgang hat sich dort bei sehr schwierigen Bodenverhältnissen als durchaus zweckmäßig bewährt.

Die Sohle und die Seitenwände des Tunnels sind ausschließlich aus Beton ausgeführt, die Decke mit Betonkappen hergestellt. Der Beton wurde aus Portlandzement und frischgebaggertem Donauschotter hergestellt.

Die Decke besteht aus eisernen Walzträgern von 300, 320 und 350 *mm* Höhe und dazwischen betonierten Kappen von 1 *m* Spannweite. Die in demselben Abstande befindlichen Querträger lagern mit ihren Enden auf den betonierten Seitenmauern und in der Mitte auf Doppellängsträgern von 320 und 350 *mm* Höhe, welch letztere von den schmiedeeisernen Säulen in Abständen von 3 und 4 *m* unterstützt werden.

Sämtliche Träger der Decke sind einfache Profileisen, welche fertig zur Baustelle gekommen sind und dort nur verlegt und verschraubt wurden. Es entfielen damit bei der Herstellung der Decke des Tunnels alle Montierungs- und Nietarbeiten, welche nicht nur zeitraubend, sondern auch für die Nachbarschaft störend gewesen wären. Nur die Säulen, welche ursprünglich aus Gußeisen gedacht waren, mußten genietet werden. Sie kamen jedoch fertig zur Baustelle und wurden dort nur aufgestellt.

Um die Eisenteile der Tunneldecke gegen etwa eindringende Feuchtigkeit und gegen das Rosten zu schützen, wurde die Decke des Tunnels mit Asphalt-

filzplatten abgedeckt. Auf der Strecke im Grundwasser kam eine Asphaltplatten-Abdeckung über dem Fundamentbeton der Sohle des Tunnels zur Ausführung, zum Schutz gegen etwa eindringendes Grundwasser.

Die Haltestellen der Untergrundbahn wurden, wie die meisten Haltestellen der Stadtbahn in New York und London, derart angeordnet, daß im Tunnel beiderseits außerhalb der Geleise je ein Bahnsteig von 3—8 *m* Breite und 24—32 *m* Länge, je nach der Bedeutung der Haltestelle, angelegt wurde.

Jeder Bahnsteig dient also, ebenso wie das Geleise, nur für die eine Fahrtrichtung. Jeder Bahnsteig ist durch eine Treppe von dem nächsten Bürgersteig der Straße aus zugänglich gemacht. Die Breite der Treppe beträgt 1·90 und 2·5 *m*. Nur 19 bis 24 Stufen sind zwischen dem Bahnsteig der Haltestelle und dem Bürgersteig der Straßen erforderlich, also nicht einmal die Höhe des Stockwerkes eines gewöhnlichen Wohnhauses. Die Wände der Haltestellen sind mit weißen Majolikaplatten verkleidet und mit braunen Einfassungen versehen worden. Die Haltestellen, welche zum Teil Licht von der Straße her erhalten, sind im Inneren elektrisch beleuchtet und machen einen äußerst freundlichen Eindruck. Die Treppenhäuschen der Haltestellen am Giselaplatz und Oktogonplatz sind besonders reich in Pyrogranit mehrfarbig ausgeführt. Die übrigen Treppenhäuschen sind einfacher, in Eisenfachwerk mit Verkachelung aus in matten Farben hergestellten Platten errichtet worden. Nur die beiden Treppenöffnungen der Haltestelle »Oper« wurden überhaupt nicht überbaut, weil man die Ansicht des Opernhauses durch davor zu errichtende Treppenhäuschen nicht verdecken wollte. Diese Treppenöffnungen sind aus diesem Grunde mit niedrigen Brüstungen als Kalkstein eingefaßt worden.[1])

[1]) Die Tunnels in Berlin sind in ganz ähnlicher Weise bei der Siemensschen Bahn ausgeführt.

Der Oberbau der Untergrundbahn besteht aus Vignolschienen mit versetzten Stegen und Verblattstoß auf eisernen Querschwellen. Die Befestigung der Schienen auf den eisernen Querschwellen erfolgt unter Anwendung der Haarmannschen Hakenplatte mit je einer Schraube. Die Schiene ist 115 *mm* hoch und wiegt 24·2 *kg* für den laufenden Meter. Die eisernen Schwellen sind in ein Doppelbett verlegt. Mit diesem Oberbau wird ein nahezu stoßfreies Fahren erreicht, was nicht nur zur Annehmlichkeit der Fahrgäste dient, sondern auch für die Wagenmotoren von großem Vorteil ist.

Die Maschinenanlage zum Betriebe der Untergrundbahn wurde, wie schon oben erwähnt, im Anschluß an die bestehende Maschinenanlage der Budapester elektrischen Stadtbahn, welche den Betrieb der Untergrundbahn führt, errichtet.

Der Dampf wird von 4 Stück Wasserrohrkesseln von je 267 m^2 Heizfläche erzeugt. Die im Maschinenhause für die Untergrundbahn arbeitenden beiden Verbunddampfmaschinen mit Kondensation treiben je eine Innenpol-Dynamomaschine unmittelbar an. Die Dynamomaschine leistet bei 300 V dauernd 1100 A, liefert aber auch zeitweise Strom bis zu 1400 A.

Von dem Schaltbrett der Stromerzeugungsanlage führen nach der nächstgelegenen Haltestelle »Oktogonplatz« der Untergrundbahn mit Eisenband gepanzerte Bleikabel, welche in die Straßen eingebettet sind, und zwar besondere Kabel für den Betrieb der Wagen, für die Beleuchtung der Haltestellen und die Lichtblocksicherungseinrichtung, sowie für den Fernsprechverkehr. Es sind durchweg, also auch für die Arbeitsleitungen längs der Geleise isolierte Hin- und Rückleitungen angewendet worden, um in der Stromerzeugungsanlage die Maschinen zum Betriebe der Untergrundbahn und die Maschinen zum Betriebe der mit unterirdischer Stromleitung ausgerüsteten Stadtbahn parallel schalten

zu können. Die Schienen der Bahn werden also nicht als Rückleitung benutzt.

Die sämtlichen Leitungsanlagen der Untergrundbahn sind im Tunnel an der Decke desselben und auf der anschließenden offenen Strecke an von Säulen getragenen Querdrähten aufgehängt. Als Arbeitsleitungen für die Stromabnahme dienen im Tunnel 50 *mm* hohe Grubenbahnschienen und längs der offenen Bahn 10 *mm* starke Hartkupferdrahtleitungen. Die Speiseleitungen längs der Untergrundbahn, welche die Fortsetzung der Kabelzuleitungen bilden, sind als blanke Kupferseile im Tunnel aufgehängt worden.

Besondere Erwähnung verdient noch die Sicherungsanlage dieser Bahn.

Die Wagen dürfen, laut behördlicher Vorschrift, in keiner kleineren Entfernung einander folgen, als der Abstand der Haltestellen beträgt. Um dieser Vorschrift entsprechen zu können, sind am Ausfahrtsende an den Stirnwänden der Haltestellen Lichtblocksignale angeordnet worden, welche in sinnreicher Weise von dem Wagen selbsttätig aus- und eingeschaltet werden. Zu diesem Zwecke ist bei der Ausfahrt aus jeder Haltestelle neben den Geleisen ein Umschalter angebracht, welcher von einem an dem hinteren Ende eines jeden Wagens angebrachten Tasteisen betätigt wird. Sobald ein Wagen aus der Haltestelle heraus den Umschalter befährt, zeigen die Glühlampen des Signals an der Ausfahrt rotes Licht, decken also den ausgefahrenen Wagen, während in der zurückliegenden Haltestelle gleichzeitig weißes Licht erscheint, zum Zeichen, daß die Strecke bis zur soeben verlassenen Haltestelle frei ist. In der nun nach vorn liegenden Haltestelle wird neben dem eigentlichen Signallicht eine kleine rote Kontrollampe sichtbar als Ankündigung, daß ein Wagen unterwegs ist und in die Haltestelle demnächst einfahren wird. Infolge dieser Einrichtung sind die Wagen,

da rotes Signallicht »Halt« und weißes Signallicht »Freie Fahrt« bedeutet, gezwungen, wenigstens in Entfernungen der Haltestellen zu fahren. Außerdem ist jeder Bahnsteigwärter in der Lage, aus den Lampen der Signaleinrichtungen zu ersehen, ob sich ein Wagen auf der Strecke zwischen den benachbarten Haltestellen und seiner eigenen befindet oder nicht.

Im Falle einer Störung in der Lichtblockanlage muß das Telephon zur Signalisierung der Wagen benutzt werden. Zu diesem Zwecke hat jede Haltestelle ein Telephon und man kann von jeder Haltestelle aus unter Vermittelung der Telephonzentrale in der Stromerzeugungsanlage mit jeder beliebigen Haltestelle der Untergrundbahn sprechen. Außerdem können die Endbahnhöfe der Bahn unmittelbar, d. h. ohne Vermittelung der Zentrale, mit dem Betriebsbahnhofe sprechen, woselbst sich der Wagendienst abwickelt.

Die Wagen der Untergrundbahn sind als Drehgestellwagen ausgeführt. In jedem Drehgestell ist ein Elektromotor eingebaut, welcher eine Achse antreibt. Die Entfernung der Drehzapfen beträgt 8 *m* und die Länge zwischen den Buffern 11 *m*. Die Breite des Wagens ist 2·35 *m*. Jeder Wagen hat 26 Sitz- und 14 Stehplätze. An den Wagenenden sind kleine Räume für den Wagenführer und die Schaltvorrichtungen vorgesehen. Im ganzen sind 20 Wagen vorhanden. Es können gleichzeitig 14 Wagen als Einzelwagen verkehren, welche dann einen Betrieb mit einer Wagenfolge von zwei Minuten ergeben. Von den 20 Wagen sind 10 Stück mit zweipoligen Motoren und Doppelkettenantrieb ausgerüstet und 10 Wagen mit vierpoligen Motoren, welche um die vordere Achse der Drehgestelle gebaut sind. Das Eigengewicht eines Untergrundbahnwagens beträgt 15 *t*.

Der Betrieb der Untergrundbahn wurde am 2. Mai 1896 eröffnet. Die Fahrkartenausgabe ist die

bei den Stadtbahnen übliche. Beim Eintritt auf einen Bahnsteig wird die Fahrkarte gelöst und beim Verlassen der Bahn wieder abgegeben. Jeder Wagen wird außer von dem Wagenführer noch von einem Schaffner begleitet.

Die elektrische Zahnradbahn in Barmen.

Die Bahn beginnt auf dem inmitten der Stadt gelegenen Grundstück Cleverstraße 36/38, übersetzt auf einer zirka 20 *m* langen und 9 *m* breiten eisernen Überführung die Bergisch-Märkische Staatsbahn und biegt, nachdem sie die Kampstraße im Niveau gekreuzt, in die sehr steile Luisenstraße (1 : 5·4) ein, kreuzt die Gewerbeschulstraße, durchläuft die etwa 400 *m* lange Luisenstraße und tritt alsdann, nachdem sie noch die Lichtenplatzerstraße im Niveau überschritten, in den Barmerwald ein.

Die Bahn schwenkt im weiteren Verlaufe mit einer Kurve von 250 *m* Radius von der Achse der Luisenstraße ab und endigt auf der Höhe des Bergkammes unweit des Toelleturms.

Unmittelbar an die elektrische Zahnradbergbahn schließt sich eine Schmalspur-Adhäsionsbahn mit Lokomotivbetrieb an, welche eine Verbindung mit der Ronsdorf-Müngstener Eisenbahn herstellt, so daß die meist besuchten Ausflugsorte: die Talsperre bei Remscheid, die Viadukte bei Müngsten, Schloß Burg u. s. w., von Barmen schnell und bequem erreicht werden können.

Die Gesamtlänge der elektrischen Zahnradbahn beträgt 1630 *m*. Die untere Station liegt auf 159·66 NN. etwa 5·40 *m* über der Cleverstraße, die obere Station auf 329·20 *m*, mithin beträgt die erstiegene Höhe rund 170 *m*, die mittlere Steigung ist daher $\frac{170}{1630}$, das ist rund 1 : 10. Die stärkste Steigung (Luisenstraße) ist

1:5·4 und 1:7·2. Der geringste Kurvenradius am Übergang in der Luisenstraße beträgt 150 *m*, die Kurve im Barmerwald hat 250 *m* Radius.

Außer den beiden Endstationen, die in den Horizontalen liegen, befindet sich eine Haltestelle oberhalb der Lichtenplatzerstraße bei Station 5+20 *m* und eine solche in der Nähe der Kohlenstraße bei Station 11+50 *m*. Die Bahn ist durchweg zweigeleisig und hat eine Spurweite von 1 *m*. In der Mitte jedes Geleises ist die Zahnstange Riggenbach'scher Konstruktion angeordnet (Teilung 75 *mm*, Abstand der Wangeneisen 90 *mm*, Länge der Zahnstangenstücke 3 *m*). Für den in der Straße gelegenen Teil der Bahn gelangten Rillenschienen (Phönix), für die freie Strecke Vignolschienen zur Verwendung; Schienen und Zahnstange sind auf eisernen Querschwellen, deren Abstand durchgängig 1 *m* beträgt, gelagert. Um Abrutschen, beziehungsweise Talwärtswandern des gesamten Gestänges zu verhindern, sind die Schienen sowohl wie die Zahnstange mit Fußstützen, welche hinter die Schwellen greifen, versehen. In Abständen von 30 bis 40 *m* sind je zwei Schwellen auf tief fundierten kräftigen Widerlagsmauern verankert. Die Schienen von 9 *m* Länge sind mit ruhenden Stößen verlegt, während die Zahnstange schwebende Stöße erhalten hat.

Zur Umsetzung der Wagen in den beiden Endstationen dienen versenkte Schiebebühnen, die mittels Elektromotoren angetrieben werden. Diese Bühnen werden von dem Fahrpersonal der Wagen gehandhabt, so daß besondere Bedienungsmannschaften für das Umsetzen der Wagen nicht erforderlich sind.

Als Betriebsmittel sind zunächst nur Personenwagen eingestellt, dieselben bieten Sitzplätze für 28 Personen und Stehplätze für 8—10 Personen. Die Länge der Wagen beträgt 8 *m*, die größte Breite derselben 2·450 *m*; der Wagenkasten ist 6·12 *m* lang und

2·15 *m* breit. Der Wagen hat vier Abteile, von denen die beiden mittleren von der Seite, die beiden äußeren von den Plattformen zugänglich sind. Jeder Wagen hat zwei Laufachsen mit je einem auf diesen gelagerten und in die Zahnstangen eingreifenden Zahnrade und zwei unabhängig von einander wirkende vierpolige Elektromotoren von je 60 PS. Leistung, die mittels Zahnradübersetzung auf je ein Zahnstangenrad wirken. Jede Achse beziehungsweise jedes Zahnrad ist mit einer selbständigen Bremsvorrichtung ausgerüstet. Beide Bremsen können von jeder Endplattform aus durch je eine Handkurbel mittels Schraubenspindel angezogen werden. Ferner ist unter dem Wagen eine selbsttätige Bremse angebracht, welche den Wagen unabhängig vom Führer feststellt, sobald eine bestimmte, genau zu regulierende Geschwindigkeit (etwa 2 *m* per Sekunde) überschritten wird. Die hierzu erforderliche Bremskraft ist aufgespeichert in einer gespannten Feder, deren Hemmung durch einen Zentrifugalregulator ausgelöst wird, sobald die zulässige Geschwindigkeit überschritten wird und die alsdann beide Bremsen feststellt. Drittens haben die Wagen noch eine mechanische Sicherheitsbremse und zwar für den Fall, daß beide Zahnstangenräder gleichzeitig brechen sollten. Diese Bremse ist eine sogenannte Keil- oder Schlittenbremse und besteht aus schmiedeeisernen Schuhen, die sich bei der Bremsung vor die Laufräder legen und dem Wagen ein Auflaufen auf die Schuhe gestatten. Die Reibung zwischen den breiten Schuhen und den Schienen verhindert dann ein Herabrollen des Wagens.

Diese Sicherheitsbremse kann von jedem Perron aus durch den Wagenführer in Tätigkeit gesetzt werden.

Außer diesen drei mechanischen Bremsen besitzt der Wagen noch eine vierte elektrische Bremseinrichtung, welche den Zweck hat, die Wagen mit

einer gleichförmigen Geschwindigkeit bergab fahren zu lassen, ohne daß eine mechanische Bremse benützt wird. Um diese elektrische Bremsung zu erzeugen, werden die Motoren der Wagen bei der Talfahrt als primäre Maschinen derart geschaltet, daß sie Strom von derselben Spannung wie die stationäre Anlage erzeugen. Dabei werden von der mechanischen Arbeit, welche die bergab rollenden Wagen erzeugen, zirka 65% nutzbar in Strom umgesetzt, so daß von der für die Bergfahrt aufzuwendenden Stromarbeit etwa die Hälfte durch den talwärts fahrenden Wagen wiedergewonnen wird. Die stationäre Maschinenanlage hat demzufolge auch etwa nur die Hälfte der gesamten erforderlichen Stromarbeit zu liefern und kann daher verhältnismäßig geringe Größe erhalten. Da die Arbeit der zu Tal fahrenden Wagen nutzbar gemacht wird und nicht durch das Abschleifen von Bremsklötzen und Radreifen vernichtet zu werden braucht, so wird durch diese, hier zum ersten Male praktisch durchgeführte Betriebsart noch der große wirtschaftliche Vorteil erreicht, daß die bei anderen Bergbahnen unvermeidlichen hohen Kosten für die Unterhaltung der Bremsen und Radreifen hier tatsächlich sehr gering ausfallen.

Die Beleuchtung der Wagen erfolgt durch sechs elektrische Glühlampen, die direkt von den Hauptzuleitungen für die Wagen gespeist werden.

Die Zuleitung des elektrischen Stromes, dessen Spannung 550 Volt beträgt, erfolgt oberirdisch durch Kupferdrähte, die über der Mitte der Geleise, in etwa 5 *m* Höhe herlaufend, isoliert an quer über die Straße gespannten Drähten, aufgehängt sind. Die Querdrähte sind in der Straße an architektonisch durchgebildeten Mannesmannrohrsäulen, in der freien Strecke an Holzsäulen befestigt. Der mittels zweier auf dem Wagendach angebrachten Schleifbügel vom Fahrdraht entnommene Strom wird, nachdem er die Motoren des

Wagens durchlaufen und diese in Bewegung gesetzt hat, durch die Schienen zurück in die Zentrale geleitet. Da durch die Stoßverbindungen der Schienen eine rein metallische Berührung derselben nicht gewährleistet ist, sind die Schienen zur möglichsten Herabminderung des elektrischen Widerstandes durch Kupferdrähte an den Stößen gutleitend verbunden.

Die Maschinenanlage zur Erzeugung des zum Bahnbetriebe erforderlichen Stromes befindet sich in den Erdgeschoßräumen des unteren Bahnhofes. Zwei Verbundkondensationsmaschinen, von denen jede bei 165 Turen 200—250 PS. leistet, haben unter den Bahnviadukten Aufstellung gefunden. Zwei Innenpolringdynamos für 500 Volt Spannung sind mit den Dampfmaschinen direkt gekuppelt. Den erforderlichen Dampf von zehn Atmosphären Spannung liefern drei Wasserrohrkessel (Steinmüller) von je 181·7 m^2 Heizfläche. Einer dieser Kessel dient als Reserve. Für die Gewinnung des Kesselspeisewassers, sowie des Kühlwassers für die Kondensatoren, sind zwei Brunnen, einer im Hofe der Zentrale, der zweite im Bette der Wupper angelegt. Beide sind durch ein Heberohr miteinander verbunden. Das Speisewasser passiert vor seiner Verwendung einen Reinigungsapparat, sowie einen selbsttätig registrierenden Wassermesser.

Bei der teilweise bereits ausgeführten Erweiterung der Krafterzeugungsstätte können noch zwei Dampfmaschinen mit Dynamos, sowie zwei weitere Kessel Aufstellung finden.

Die Zentralstation versorgt nicht allein die Bergbahn mit elektrischem Strom, sondern gibt denselben auch zur Kraftleistung an Private ab. Sie liefert ferner den Strom für die im Laufe des Sommers 1894 ausgeführte, am 1. September 1894 in Betrieb gesetzte elektrische Straßenbahn, die von der Rathauserbrücke durch die Cleverstraße am Bahnhof der Bergbahn vor-

beiführend, über die Herzogbrücke und durch die Heckinghauserstraße verlaufend, den Stadtteil Heckinghausen mit dem Mittelpunkt der Stadt Barmen verbindet.

Diese Heckinghausener Linie ist eingeleisig mit Ausweichen angelegt, hat normale Spur und wird mit acht Wagen für je 28 Plätze, ähnlich den von der Firma Siemens & Halske für die elektrischen Straßenbahnen von Hannover und Dresden gelieferten, befahren.

Eine zweite Straßenbahn, die vom Marktplatze, unweit des Bergbahnhofs beginnend, nach dem Stadtteil Wichlinghausen führt, ist im Laufe des Sommers 1895 zur Ausführung gebracht. Auch für diese Linie, sowie für die Straßenbahn Barmen—Eberfeld liefert die von der Firma Siemens & Halske errichtete Krafterzeugungsstätte den Strom.

Schluß.

Wir haben in den voraufgegangenen Abschnitten die Einrichtung der elektrischen Straßenbahnen als Flachbahnen, Hoch- und Untergrundbahnen kennen gelernt und die am Ende des Werkes gegebenen Beschreibungen verschiedener, ausgeführter Anlagen werden dem Leser ein hinreichendes Bild der verschiedenartigsten Einrichtungen gewähren. Es sind jedoch noch besondere Tiefbahnen für großen Stadtverkehr in großen Städten im Gebrauch, die hier noch erwähnt sein mögen, da sie ja gleichfalls zur Vermittelung des Schnellverkehrs in den Straßen dienen. Auch den Industriebahnen ist noch ein kurzer Abschnitt gewidmet. Sie sind teilweise auch als Straßenbahnen angelegt.

Möge das Werk eine gleich freundliche Aufnahme finden wie meine zuvor herausgegebenen Bände.

Tiefbahnen.

Die bisher beschriebenen Anlagen von Untergrundbahnen, wie die in Berlin und Budapest, sind insofern leichter herzustellen, als sie in geringerer Tiefe als Unterpflasterbahnen angelegt werden konnten. In anderen Städten, wie z. B. in London, war dies nicht möglich, und man war gezwungen, in größerer Tiefe Tunnelbahnen als Röhrenbahnen zu bauen.

Seit langen Jahren sind mehrere unterirdische Dampfbahnen bereits im Betrieb, bei denen gemauerte

Tunnels für die Fahrbahn hergestellt sind, die bei den Stationen und teilweise auch auf der Strecke, wo es möglich ist, zutage treten. Die Anlage derselben war jedoch sehr kostspielig und der Verkehr genügte nicht mehr dem Andrange der Massen und vor allen Dingen auch nicht für den Verkehr nach gewissen Außendistrikten. Man hat daher eine größere Anzahl Röhrenbahnen hergestellt, wie z. B. von der Mitte der Stadt, der Bank in der City nach Shepperds Bush. Es ist dies die Central London Railway. Eine zweite Linie geht von derselben Stelle in der City ab nach Südwesten und endigt in Clapham. Es ist dies die City und South London Railway. Eine dritte Linie verbindet die Bank mit der Station Waterloo auf der anderen Seite der Themse. Außerdem ist noch die Linie von der Waterloo-Station über Charing Cross nach Baker Street im Bau begriffen und eine Reihe anderer Linien ist teils konzessioniert, teils im Projekt.[1])

Alle diese Bahnen sind durch pneumatische Gründung und bergmännischen Abbau durch Vertreiben von Stollen und einen besonderen Schild vor Ort hergestellt, indem man eiserne Rohre aus Flußeisen je nach dem Fortschreiten der Arbeit eingebaut hat, die etwa 1 *m* Länge haben und aus einer größeren Anzahl von Stücken durch Flanschen und Bolzen zusammengeschraubt sind. Für jedes Geleise ist für die zweigeleisige Strecke ein besonderer Röhrentunnel hergestellt, in welchem ganz ähnlich wie bei den Berliner und Budapester unterirdischen Bahnen, die Geleise angelegt wurden. Als Stromzuführung dient eine dritte Schiene in der Mitte der Geleise. Der Betrieb erfolgte zunächst durch besondere Lokomo-

[1]) Siehe »Proceeding of the Institution of Civilengineers, London 1900«. — »The Electrical Equipment of the Waterloo and City Railway« von Prof. R. M. Jenkin. Ferner: »The Central London Railway«. — »The British Thomson Honston Comp. Ltd., London 1898«. — »The Rapid Transit Problem in London« von Franc J. Sprague in »The Engineering Magazine«, Oktober 1901.

tiven[1]), deren hohes Gewicht jedoch zu unangenehmem Geräusch Veranlassung gab, so daß man jetzt wohl auch Motorwagen anwenden wird.

Die 8—12 *m* unter der Erdoberfläche beziehungsweise der Themse gelegenen Stationen sind sowohl durch Wendeltreppen, als auch durch große Aufzüge nach der Konstruktion von Sprague zugänglich. Jede Station ist mit 3—5 derartigen elektrischen Aufzügen ausgerüstet, von denen jeder 50—100 Personen fassen kann. Das Anhalten der Züge geschieht selbsttätig, das Anfahren durch den Fahrstuhlführer. Besonders die Central-London-Untergrundbahn ist insofern interessant, als sie die größte Linie von 11·93 *km* Länge bildet und in der Kraftstation mit sechs Drehstrommaschinen von je 850 Kilowatt Leistung ausgerüstet ist. Dieselben geben 5000 Volt Spannung, welche mit Transformatoren und rotierenden Umformern auf Gleichstrom umgeformt wird. Die Linie hat 13 Stationen und einen sehr lebhaften Verkehr.

Industriebahnen.

Eine besondere Art von Straßenbahnen bilden die Industriebahnen, die meistens nicht auf besonderen Bahnkörpern angelegt sind, sondern auf Feldwegen, Kunststraßen oder auch in den Stollen der Bergwerke angewendet werden. Entsprechend dem Zweck und dem Charakter dieser Bahnen ist ihr ganzer Unterbau leichter gehalten und auch die Spurweite meistens geringer als die Normalspur. Für gewöhnlich verwendet man 60 oder 75 *cm* Spurweite. Eine äußerst wichtige Rolle spielen z. B. diese Bahnen in Ziegeleien, Brennereien und besonders auch in den Zuckerfabriken,

[1]) Siehe auch Blondel et Dubois: »La Traction Électrique.« Band I und II. Paris 1898.

bei denen sie dazu gebraucht werden, die auf großen Feldflächen in langen Gruben aufbewahrten Rüben je nach Bedarf den Fabrikgebäuden zuzuführen. Da bei diesen verschiedenen Betrieben sehr oft Veränderungen der Geleise, Verschiebungen, Verlängerungen und dergleichen notwendig werden, so hat man besonders leicht transportable Geleise hergestellt und auch die dazu notwendigen Weichen und Drehscheiben in einfachster Form gestaltet. Die Geleise bestehen aus nur etwa 6 *m* langen, durch Querverbindungen fest zusammengefügten Strecken, die je nach Bedarf aneinander gestoßen und durch Laschen verbunden werden. Um den Transport derartiger Geleise und die Anschaffungskosten zu erleichtern, sind auch die Schienen nicht so stark, wie bei den übrigen beschriebenen Bahnanlagen. Es sind gewöhnlich schwache Vignolschienen von 60—80 *mm* Höhe, wie sie z. B. von der Aktiengesellschaft, vormals Arthur Koppel in Bochum und Berlin, geliefert werden. Man verwendet derartige Schienengeleise auch für größere Erdbauten oder überhaupt für Bauausführungen, um das Material über das Gelände hinweg zu verteilen oder überschüssige Erde fortzuschaffen.

Als rollendes Material dienen hauptsächlich bei diesen kleinen Bahnanlagen sogenannte Kipp- oder Muldenkarren, bei denen der Behälter in einem muldenförmigen Kasten besteht, der an jedem Ende an einem oder zwei Stiften aufgehängt ist, so daß man je nach Bedarf den Behälter nach der einen oder der anderen Seite umkippen und seines Inhaltes entleeren kann.

Für die Anfertigung eines Kostenanschlages auf Grund eines Lageplanes, gibt der nachfolgende Fragebogen hinreichend Auskunft.[1])

1. Was für Material soll transportiert werden?

[1]) Aufgestellt von Arthur Koppel, nach Elektrischer Verkehrstechnik, Jena 1902.

2. Wie groß ist das tägliche Transportquantum in jeder Richtung und wieviel Arbeitsstunden ist es zu transportieren?

3. Wieviel Wagen sind bereits vorhanden?

4. Wie sind die Hauptangaben für die Wagen?

Type der Wagen?
Wageninhalt?
Wagengewicht?
Spurweite?
Radstand?
Länge des Untergestelles (einschließlich der Puffer)?
Höhe der Puffermitte über Schienenoberkante?
Breite des Untergestelles?
Länge des Wagenaufsatzes?
Breite des Wagenaufsatzes?

5. Wie ist das Terrain beschaffen, auf dem die Bahn angelegt werden soll (ob Acker, Wiese, Wald, Chaussee, Feldweg, gepflasterter Hof etc.)?

6. Ist durch eine Durchfahrt eine Maximalhöhe des Leitungsdrahtes vorgeschrieben und wie groß ist dieses Maß?

7. Ist durch einen Wegübergang oder durch den Verkehr von Erntewagen eine Mindesthöhe des Leitungsdrahtes vorgeschrieben und wie groß ist dieses Maß?

8. Wie sind die Hauptangaben für die Bahnstrecke?

Gesamtlänge?
Anzahl der Kurven?
Größe der Kurvenradien?
Steigungsverhältnisse?
Größte bergauf zu befahrende Steigung in Prozent?
Länge dieser Steigung?
Anzahl der Ausweichungen?
Anzahl der Kreuzungen?

9. Sollen vorhandene Geleise benutzt werden?
10. Wie sind die Hauptangaben für die Geleise?
    Gesamtlänge?
    Schienenhöhe?
    Schienenprofil (skizziert), beziehungsweise Gewicht der Schiene pro laufenden Meter?
    Holz- oder Stahlschwellen?
    Schwellenprofil und Anzahl der Schwellen pro Geleisrahmen?
    Länge der Geleisrahmen?
    Art der Stoßverbindung?
11. Findet ein Verlegen der Geleise statt und wie oft?
12. Soll eine vorhandene Dynamomaschine zur Stromerzeugung dienen?
13. Wie sind die Hauptangaben für diese Dynamomaschine?
    Spannung in Volt?
    Stromstärke in Ampère?
14. Soll eine vorhandene Kraftmaschine (Dampfmaschine, Turbine, Gasmotor etc.) zum Antrieb der Dynamomaschine dienen?
15. Wie sind die Hauptangaben für diese Kraftmaschinen?
    Zum elektrischen Betriebe abzugebende Leistung in effektiven Pferdestärken?
    Tourenzahl pro Minute?
    Durchmesser und Breite der Antriebsscheibe?
    Art der Maschine (liegende oder stehende, Einzylinder- oder Compound-Dampfmaschine, Steuerung etc.)?
16. Sollen vorhandene Kessel zur Dampferzeugung dienen?
17. Wie sind die Hauptangaben für diese Kessel?
    Dampfdruck in Atm. Abs.?
    Wasserberührte Heizfläche in Quadratmetern?

Art der Kessel (Cornwall- oder Wasserrohrkessel etc.)?

18. Wie groß ist die Länge der Speiseleitung, d. h. die Entfernung von der Dynamomaschine bis zum nächsten Punkt der Bahnstrecke?

19. Wieviel Meter der Speiseleitung sind durch geschlossene Räume zu führen, wieviel Meter im Freien zu verlegen?

20. Liegt die Maschinenstation an einem Ende der Bahnstrecke oder in welcher Entfernung hiervon liegt sie?

21. Soll die Dynamomaschine auch zur Beleuchtung oder zum Motorenantrieb dienen? Zur Zeit des Bahnbetriebes oder außerhalb dieser Zeit?

22. Wieviel Strom in Ampère wird hierfür benötigt oder wie ist die Anzahl der Glühlampen?

Anzahl der Bogenlampen?

Anzahl der Elektromotoren?

Leistung der einzelnen Elektromotoren in effektiven Pferdestärken?

Während man bisher diese Industriebahnen hauptsächlich mit Pferden betrieb, ist man in den letzten Jahren vielfach dazu übergegangen, auch diese Bahnen für elektrischen Betrieb einzurichten, und zwar meistens für Oberleitungsbetrieb.

Die Oberleitung wird entweder wie bei den Straßenbahnen an leichten hölzernen Masten mit Auslegern befestigt oder auch vielfach in der Mitte eines eisernen Bogens oben über der Straße angebracht, während der Bogen selbst aus Profileisen bestehend, unten an den eisernen Schwellen verschraubt oder vernietet ist. Der Querdraht, welcher für diesen Zweck meistens nur 3 *mm* stark gewählt wird, ist auf einer Trommel aufgerollt, die sich auf einem Drahtkarren oder auf einem Bock befindet. Je nach Bedarf wickelt man den Draht auf diese Trommel auf oder man schafft den Draht-

karren bei Verlängerung der Strecke weiter hinaus, rollt den Fahrdraht von der Trommel ab und befestigt ihn an den Drahtisolatoren. Auf diese Weise werden auch vielfach auf großen Landgütern die Produkte des Feldes nach den Vorratsräumen oder Vorratsgruben geschafft.

Da die größeren landwirtschaftlichen Betriebe heute bereits vielfach auch mit elektrischem Betrieb Dreschmaschinen, Reinigungsmaschinen etc. für das Getreide betreiben, Brennereien und Brauereien elektrische Beleuchtung haben, so macht es keine großen Schwierigkeiten, die elektrische Kraft auch für die kleinen Feldbahnen zu benutzen. Da diese Bahnen nur eine Kraft von 4—10 HP. gebrauchen und keine bedeutende Länge haben, so kann man sehr wohl mit einer Spannung von 110—120 Volt wie sie für Beleuchtung gebraucht wird, auch bei den Industriebahnen auskommen.

Wie vorteilhaft der elektrische Betrieb gegenüber dem Pferdebetrieb für Industriebahnen ist, zeigt die nachstehende Tabelle, in welcher der Pferdebetrieb mit dem elektrischen Betrieb einer Ziegelei verglichen ist, welche in 200 Tagen für das Jahr 10.000 m^3 Ton zu transportieren hatte, auf einer Länge von 1000 *m* mit Steigungen bis zu 1% und bei einer Spurweite von 50 *cm*.

Elektrischer Betrieb.

Als Stromquelle dient die vorhandene Lichtmaschine mit 110 Volt Spannung. Die Kraftanlage wird von Licht und Transport gleich stark beansprucht, so daß die Amortisation für beide Anlagen zur Hälfte zu verteilen ist. Die Fahrzeit ist 15 *km* in der Stunde und ergibt sich daher die Dauer für Hin- und Rückfahrt mit 5 Minuten Aufenthalt für das Rangieren

$$60 \cdot 2 : 15 = 8 + 5 = 13 \text{ Minuten.}$$

Die elektrische Lokomotive leistet 6 PS. bei einem Gewichte von 1500 *kg*. Bei der angegebenen Steigung zieht dieselbe drei voll beladene Kippwagen für je $^3/_4$ m^3 Inhalt. Es sind jedoch fortzuschaffen 10.000 : 200 = 50 m^3 oder 10·0 Tons Material. Da ein Wagen 1·5 Tons faßt, so sind täglich 100 : 1·5 × 3 = 21 Fahrten notwendig. Nach Bedarf wird gewöhnlich direkt in den Ziegelpressen entladen und hierzu drei Züge zu drei Wagen also neun Wagen gebraucht.

Betriebskostenberechnung:

a) **Unterhaltungskosten:**

1.	des Oberbaues 2% von *M.* 2740·—	*M.* 54·80
2.	der elektrischen Streckenausrüstung 1% von *M.* 2155·—	*M.* 21·55
3.	des rollenden Materials 3% von *M.* 4355·—	*M.* 130·65
4.	der Zentralstation (zirka *M.* 5000·— Anschaffungskosten) die Hälfte von 2%, also 1% von *M.* 5000·— . .	*M.* 50·—
	Limitsumme	*M.* 257·—

b) **Gehälter:**

5.	des Lokomotivführers (200 Tage) .	*M.* 700·—
6.	der Hilfskraft für den Maschinisten	*M.* 500·—

c) **Materialverbrauch:**

7. Energieverbrauch pro Tag 11·3 Kilowattstunden an der Dynamo, d. i. $\frac{11{\cdot}3 \,.\, 1000}{736 \,.\, 0{\cdot}87} = 17{\cdot}6$ Pferdestunden an der Dampfmaschine, also mit Zuschlag für Leerlauf der Dynamo, Anfahren und Bremsung etc. zirka 20 Pferdestunden. Kohlenverbrauch 20·2 = 40 *kg* Kohle, d. i. bei 200 Ar-

beitstagen 40 . 200 = 8000 *kg* Kohle
à 2 Pfennig im Mittel . . . . . *M.* 160·—
dazu für Anheizen zirka 10% . . *M.* 16·—

d) **Putz- und Schmiermaterial:**

8. für das rollende Material 1% von *M.* 4355·— . . . . . *M.* 43·55
9. für die Dynamo- und Dampfmaschine die Hälfte von 1% also ½% von *M.* 5000·— . . . . . *M.* 25·—

e) **Zinsen und Amortisation:**

10. für die Zentralstation 6% von *M.* 5000·— . . . . . *M.* 300·—
11. für das übrige Anlagekapital 12% von *M.* 10.000·— . . . . . *M.* 1200·—

Gesamtbetriebskosten *M.* 3201·55

Pferdebetrieb.

Ein Pferd kann durchschnittlich 70 *kg* Zugkraft entwickeln bei 30 *km* Geschwindigkeit pro Tag und zieht somit $\frac{70}{12} = 6$ Tons auf Feldbahngeleisen, d. i. in unserem Falle = 3 beladene Muldenkippen von ¾ cm^3 Inhalt.

Dauer der Hinfahrt ⅓ Stunde . 20 Minuten
Dauer der Rückfahrt ⅓ Stunde . 20 »
Zuschlag für Umspannen . . . 10 »

zusammen . . 50 Minuten.

Also kann ein Pferd bei achtstündiger Arbeitszeit $\frac{8 \cdot 60}{50}$ neunmal hin- und zurückfahren und transportiert täglich 3·1, 5·9 = 40·5 Tons Nettolast. Es sind somit $\frac{104}{40 \cdot 5} = 3$ Pferde und 3 . 3 . 3 = 27 Wagen erforderlich.

Das Anlagekapital beträgt für:

1. Oberbau	*M.*	2.740·—
2. Rollendes Material	*M.*	2.565·—
3. Drei Pferde mit Geschirr . . .	*M.*	2.400·—
4. Geleismontage	*M.*	295·—
5. Stallung	*M.*	2·000·—
In Summa	*M.*	10.000·—

Betriebskostenberechnung:

a) **Unterhaltungskosten:**

1. des Oberbaues 2% von *M.* 2740·—	*M.*	54·80
2. des rollenden Materials 3% von *M.* 2565·—	*M.*	76·95
3. der Pferde und Geschirre 5% von *M.* 2400·—	*M.*	120·—
4. des Stalles 1% von *M.* 200·— .	*M.*	2·—

b) **Gehälter:**

5. der drei Wagenführer	*M.*	2100·—
6. des Stallhüters	*M.*	700·—

c) **Futter:**

7. für drei Pferde	*M.*	2250·—

d) **Putz- und Schmiermaterial:**

8. für das rollende Material 1% von *M.* 2565·—	*M.*	25·65

e) **Zinsen und Amortisation:**

9. für drei Pferde und Geschirre 24% von *M.* 2400·—	*M.*	576·—
10. für den Oberbau und das rollende Material 10% von *M.* 5305·— .	*M.*	530·50
11. für die Stallung 8% von *M.* 2000	*M.*	160·—
Gesamtbetriebskosten .	*M.*	6.595·90

Also werden bei elektrischem Betriebe zirka 50% der Gesamtbetriebskosten gespart.

A. Hartleben's Elektro-technische Bibliothek

Eine Darstellung des ganzen Gebietes

der angewendeten Elektricität nach dem Standpunkte der Gegenwart.

INHALT DER SAMMLUNG:

1. Band. Glaser-De Cew. Die dynamo-elektrischen Maschinen. Ihre Geschichte, Grundlag Construction und Anwendungen. 6. Aufl., bearb. von Dr. F. Auerbach. — 2. Band. elektrische Kraftübertragung und ihre Anwendung in der Praxis, mit besonderer Rücksi auf die Fortleitung und Vertheilung des elektrischen Stromes. Von Eduard Japing. 3. Aufl. 3. Band. Das elektrische Licht. Von Dr. A. v. Urbanitzky. 3. Aufl. — 4. Band. Die gal nischen Batterien, Accumulatoren und Thermosäulen. Eine Beschreibung der hydro- u thermo-elektrischen Stromquellen, mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. V W. Ph. Hauck. 4. Aufl. — 5. Band. Die Verkehrs-Telegraphie, mit besonderer Rücksicht auf Bedürfnisse der Praxis. Von J. Sach. — 6. Band. Telephon, Mikrophon und Radiophon, besonderer Rücksicht auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von Theodor Schwartze. 3. A lage. — 7. Band. Die Elektrolyse, Galvanoplastik u. Reinmetallgewinnung, mit besonde Rücksicht auf ihre Anwendung in der Praxis. Von Eduard Japing. 2. Aufl. — 8. Band. elektrischen Mess- u. Präcisions-Instrumente. Ein Leitfaden der elektrischen Messkunde. V A. Wilke. 2. Aufl. — 9. Band. Die Grundlehren der Elektricität, mit besonderer Rücksi auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von W. Ph. Hauck. 3. Aufl. — 10. Band. Elektrisch Formelbuch mit einem Anhange, enthaltend die elektrische Terminologie in deutscher, fra und englischer Sprache. Von Prof. Dr. P. Zech. — 11. Band. Die elektrischen Beleuchtung Anlagen, mit besonderer Berücksichtigung ihrer praktischen Ausführung. Von Dr. A. v. Urb nitzky. 3. Aufl. — 12. Band. Die elektrischen Einrichtungen der Eisenbahnen und d Signalwesen. Von L. Kohlfürst. — 13. Band. Die elektrischen Uhren und die Feuerwe Telegraphie. Von Dr. A. Tobler. — 14. Band. Die Haus- u. Hôtel-Telegraphie. Von O. Cante 2. Aufl. — 15. Band. Die Anwendung der Elektricität für militärische Zwecke. Von Dr. Waechter. — 16. Band. Die elektrischen Leitungen und ihre Anlage für alle Zwecke d Praxis. Von J. Zacharias. 2. Aufl. — 17. Band. Die elektrische Eisenbahn bezüglich ihr Baues und Betriebes. Von Jos. Krämer. — 18. Band. Die Elektro-Technik in der prakt. He kunde. Von Prof. Dr. Rud. Lewandowski. — 19. Band. Die Spannungs-Elektricität, ih Gesetze, Wirkungen und technischen Anwendungen. Von Prof. K. W. Zenger. — 20. Ban Die Weltliteratur der Elektricität und des Magnetismus, 1860—1883. Von Gustav May. 21. Band. Die Motoren der elektr. Maschinen mit Bezug auf Theorie, Construction und Betri Von Theodor Schwartze. — 22. Band. Die Generatoren hochgespannter Elektricität. V Prof. Dr. J. G. Wallentin. — 23. Band. Das Potential und seine Anwendung zur Erklärun elektrischer Erscheinungen. Von Dr. O. Tumlirz. — 24. Band. Die Unterhaltung und Re ratur der elektr. Leitungen. Von J. Zacharias. — 25. Band. Die Mehrfach-Telegraphie Einem Drahte. Von A. E. Granfeld. — 26. Band. Die Kabeltelegraphie. Von Max Jüllig. 27. Band. Das Glühlicht, sein Wesen und seine Erfordernisse. Von Etienne de Fodor. — 28. Ban Geschichte der Elektricität. Von Dr. Gust. Albrecht. — 29. Band. Blitz und Blitz-Schu vorrichtungen. Von Dr. A. v. Urbanitzky. — 30. Band. Die Galvanostegie mit besonde Berücksichtigung der fabriksmässigen Herstellung von Metallüberzügen. Von Josef Schaschl 31. Band. Die Technik des Fernsprechwesens. Von Dr. V. Wietlisbach. — 32. Band. elektro-technische Photometrie. Von Dr. Hugo Krüss. — 33. Band. Die Laboratorien Elektro-Technik. Von Aug. Neumayer. — 34. Band. Elektricität und Magnetismus Alterthume. Von Dr. A. v. Urbanitzky. — 35. Band. Magnetismus u. Hypnotismus. Von W. Gessmann. 2. Aufl. — 36. Band. Die Anwendung der Elektricität bei registrirenden Ap raten. Von Dr. Ernst Gerland. — 37. Band. Elektricität und Magnetismus als kosmote rische Kräfte. Von Dr. Theodor Hoh. — 38. Band. Die Wirkungsgesetze der dynamo-el Maschinen. Von Dr. F. Auerbach. — 39. Band. Materialien für Kostenvoranschläge ele Lichtanlagen. Von Etienne de Fodor. — 40. Band. Die Zeittelegraphen und die elektr. Uh vom praktischen Standpunkte. Von Ladislaus Fiedler. — 41. Band. Die elektrischen Moto mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Strassenbahnen. Von Etienne de Fodor. 42. Band. Die Glühlampe. Ihre Herstellung und Anwendung in der Praxis. Von J. Zachar — 43. Band. Die elektrischen Verbrauchsmesser. Von Etienne de Fodor. — 44. Band. elektrische Schweissung und Löthung. Von Etienne de Fodor. — 45. Band. Die elektrisch Accumulatoren und ihre Verwendung in der Praxis. Von J. Sack. — 46. Band. Elektric direct aus Kohle. Von Etienne de Fodor. — 47., 48., 49. und 50. Band. Angewandte Elek chemie. In 4 Bänden. Von Dr. Franz Peters. 1. Band, Die Primär- und Secundär-Elem 2. Band. I. und II. Abthlg., Anorganische Elektrochemie. 3. Band. Organische Elektroch — 51. und 52. Band. Materialistisch-hypothetische Sätze und Erklärung des Wesens und Kraftäusserungen des elektrischen Fluidums. In zwei Bänden. Von Dr. F. Ph. Stögerm — 53., 54., 55. und 56. Band. Elektrometallurgie und Galvanotechnik. Ein Hand- u. Nachsch buch für die Gewinnung und Bearbeitung der Metalle auf elektrischem Wege. In vier Ba Von Dr. Fr. Peters. — 57. Band. Elektrische Straßenbahnen. Von Johannes Zacharia 58. Band. Wechselstromtechnik. Von M. T. Zsakula. I. Band. Der einphasige Wechsels — u. s. w., u. s. w.

Pro Band geheftet à 3 *K* 30 *h* = 3 Mark. Gebunden à 4 *K* 40 *h* = 4 Mark. Ab Band 5 Band geheftet à 4 *K* 40 *h* = 4 Mark. Gebunden à 5 *K* 50 *h* = 5 Mark.

Jeder Band ist für sich vollkommen abgeschlossen und einzeln käuflich

Wechselstromtechnik.

I. Band.

Der einphasige Wechselstrom.

Von

M. T. ZSAKULA
dipl. Maschineningenieur, Assistent an der techn. Hochschule in Budapest.

Mit 84 Abbildungen.

WIEN und LEIPZIG.
A. HARTLEBEN'S VERLAG.
1904.

(Alle Rechte vorbehalten.)

302754

K. u. k. Hofbuchdruckerei Carl Fromme in Wien.

Vorwort.

Anregung zum Schaffen dieses Werkes gab das Ersuchen, welches die Verlagsbuchhandlung an mich richtete, um die „Elektro-technische Bibliothek" vervollständigen zu können. Ich kam diesem Ersuchen gerne nach, da die „Elektro-technische Bibliothek" eine Lücke in der Hinsicht aufwies, daß in ihr bisher kein einziges Werk die Wechselstromerscheinungen ausführlich behandelte. Bei der eminenten Wichtigkeit des Wechselstromes in der so mächtig entwickelten Elektrotechnik ließ sich diese Lücke immer stärker verspüren, weshalb ich hoffe, daß mit vorliegendem Werke diesem Mangel abgeholfen und dem Leserkreise dieser Sammlung gedient wurde. Ist dies der Fall, dann habe ich mein Ziel erreicht.

Die größte Entwicklung in der Elektrotechnik konnte man in den letzten Jahren auf dem Gebiete der Wechselströme finden. Die großartigen Probleme der elektrischen Arbeitsübertragungen, die elektrische Traktion etc. sind nur mit Hilfe der Wechselströme zu lösen, es ist daher für jeden, der sich mit Elektrotechnik befaßt, unbedingt nötig,

sich mit den Fortschritten auf diesem Gebiete vertraut zu machen.

Es war deshalb in diesem Werke mein Bestreben dahin gerichtet, ein möglichst klares Bild vom heutigen Stande der Wechselstromtechnik zu geben. Natürlich konnte ich mathematische Ableitungen der Resultate nicht unberücksichtigt lassen, doch hoffe ich, daß dieser Umstand nur nützlich wirken kann. Das Studium der Erscheinungen verursacht in dieser Weise etwas mehr Mühe, doch wird diese Mühe durch das bessere Verständnis und die klarere Übersicht der Verhältnisse reich entschädigt.

Der erste Band behandelt den einphasigen Wechselstrom, seine Gesetze und jene Probleme, welche bei den verschiedenen Schaltungen der Ohmschen induktiven Widerstände und Kapazität sich ergeben. Dies sind grundlegende Begriffe, mit welchen die zuweilen eigentümlichen Verhältnisse in Wechselstromkreisen am besten überblickt werden können.

Der zweite Band hat die Mehrphasenströme zum Gegenstand. In diesem Bande habe ich auch die Wechselstromleitungen behandelt, wenn auch wegen Raummangels in etwas gedrängter Weise. Das Studium des ersten Bandes kann für das Verständnis des zweiten nur von Nutzen sein.

Endlich ist der dritte und der vierte Band den Wechselstromgeneratoren, Transformatoren und Motoren gewidmet. Ich habe hier auf eine erschöpfende Beschreibung der Maschinentypen verzichtet und das Hauptgewicht darauf gelegt, daß das Ver-

ständnis ihrer Wirkungsweise und Betriebseigenschaften möglichst erleichtert wird.

Eine Formelsammlung am Ende jedes Bandes soll die Übersichtlichkeit des behandelten Stoffes erleichtern.

Es bleibt mir noch die angenehme Pflicht übrig, der Verlagsbuchhandlung für ihr Entgegenkommen meinen besten Dank auszudrücken.

M. T. Zsakula.

Inhalt.

Seite

Vorwort V

I. Kapitel. Die Induktion 1

II. Kapitel. Der einphasige Wechselstrom 37
Grundbegriffe. Bestimmung des Verhältnisses zwischen der effektiven und der maximalen elektromotorischen Kraft.

III. Kapitel. Graphische Behandlung der Wechselstromprobleme. 56
Bestimmung des Arbeitseffektes eines Wechselstromes.

IV. Kapitel. Wechelstromkreise mit Ohmschem Widerstande und Selbstinduktion 84
Bestimmung der Impedanz zweier miteinander in Serie geschalteter Widerstände mit Selbstinduktion. Impedanz zweier parallel geschalteter Widerstände und Selbstinduktionen. Leistung eines Wechselstromes.

V. Kapitel. Kondensator im Wechselstromkreise . 136
Kapazität und Ohmscher Widerstand in Hintereinanderschaltung. Mehrere Ohmsche Widerstände und Kondensatoren in Hintereinanderschaltung. Induktionswiderstand und Kapazität mit Ohmschem Widerstande in Serie geschaltet. Ohmscher Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität in Parallelschaltung. Ohmscher Widerstand und Kondensator in Parallelschaltung. Ohmscher, induktiver Widerstand und Kondensator mit einem anderen Kondensator parallel geschaltet.

VI. Kapitel. Verschiedene Wellenformen 187

VII. Kapitel. Über das Messen von Wechselströmen 211
Meßmethoden. Über das Messen mit eisenhaltigen Strommessern. Eisenfreie Strommesser. Bestimmung der Konstante eines Wattmeters. Bestimmung des Formfaktors eines Wechselstromes. Bestimmung der Phasenverschiebung in einem Wechselstromkreise. Bestimmung des Selbstinduktionskoeffizienten eines Leiters. Experimentelle Bestimmung des Arbeits- und Erregerstromes. Bestimmung der Kapazität eines Kondensators. Bestimmungsmethoden der Periodenzahl eines Wechselstromes.

VIII. Kapitel. Formelsammlung 253

Namen- und Sachregister 261

I. Kapitel.

Die Induktion.

In der Geschichte der Elektrotechnik ist das Jahr 1831 von großer Bedeutung. In diesem Jahre entdeckte Michael Faraday die Induktion. Diese Entdeckung war keine zufällige, sie war vielmehr die Frucht langandauernder und schwieriger Forschungsarbeit. Es war schon früher bekannt, daß elektrische Ströme Magnetismus erzeugen, man konnte in jener Zeit schon starke Elektromagnete herstellen, doch die Umkehrung der magnetischen Wirkung, nämlich die Gegenwirkung eines Magnets auf einen Leiter zu beweisen, gelang vielen Naturforschern vor Faraday nicht.

Faraday bewickelte eine Holzspule mit langem isolierten Kupferdraht spiralförmig, und brachte auf dieselbe Spule eine andere, zwischen den Windungen des ersten Drahtes liegende und von derselben völlig isolierte zweite Drahtlage an. Die Enden der ersten Bewickelung wurden nebst einem Stromunterbrecher mit den beiden Polen einer kräftigen Elektrizitätsquelle verbunden, während die Enden des zweiten Drahtes zu einem empfindlichen Galvanometer führten. Er bemerkte, daß in dem Augenblicke als Strom in die erste Spirale geschickt wurde, das mit der zweiten Spirale verbundene Galvanometer einen Ausschlag gab, jedoch sofort in seine frühere Ruhelage zurückkehrte. Das-

selbe fand er, als er den Strom unterbrach, nur war der Ausschlag des Galvanometers ein dem ersteren entgegengesetzter. Solange der Strom im geschlossenen Kreise konstant blieb, konnte er im Galvanometerkreise keinen Strom konstatieren.

Aus diesem Versuche geht hervor, daß der im ersten Drahte fließende elektrische Strom auf den zweiten Draht in der Weise wirkte, daß er bei jeder Einschaltung und Unterbrechung in denselben einen anderen elektrischen Strom hervorrief, welcher alsdann die Nadel des Galvanometers ablenkte. Diese Erscheinung nennt man Induktion.

Die Induktionserscheinungen können aber auch in einer anderen Weise hervorgerufen werden. Man kann die Spule nur mit einem Drahte bewickeln, nur muß sie hohl sein, um einen Magnetstab aufnehmen zu können. Wenn man nun die Drahtenden mit einem Galvanometer verbindet und rasch einen starken permanenten Magnet in die Spule schiebt, zeigt das Galvanometer einen Ausschlag, gerade so wie im ersten Falle bei Schließen des Stromkreises. Wird der Magnetstab entfernt, schlägt die Nadel des Galvanometers nach der entgegengesetzten Richtung aus.

Demgemäß unterscheidet man Induktion durch elektrische Ströme und durch Magnete oder Voltainduktion und Magnetinduktion. Bei der ersten wird die Induktion durch einen elektrischen Strom, bei der zweiten durch einen Magneten hervorgerufen.

Der Versuch Faradays läßt sich mit der in Fig. 1 dargestellten Anordnung in anschaulicher Weise bewerkstelligen. Der Induktionsapparat besteht aus zwei selbständigen Spulen, welche ineinander geschoben werden können. Die Spule P ist mit der Stromquelle E verbunden, während zur Spule S ein Galvanometer G geschaltet wird. In P fließt also ein kontinuierlicher Strom, welcher zur Demonstration der Induktionserscheinungen benutzt

werden kann. Taucht man nämlich P in die Spule S, dann wirkt der Strom auf die Windungen des letzteren und es entsteht eine zweite elektrische Strömung, deren Vorhandensein durch die Ablenkung der Galvanometernadel angezeigt wird. Wird P aus S herausgezogen, entsteht ein zweiter Strom, jedoch in entgegengesetzter Richtung.

Bei dieser Anordnung spielt aber die stromdurchflossene Spule dieselbe Rolle als bei der vorhergehenden der permanente Magnet. Nachdem aber ein Magnet immer als ein solcher Körper betrachtet werden kann, den kontinuierliche Ströme fortwährend umkreisen, kann die Magnetinduktion auch als eine Voltainduktion aufgefaßt werden. Nach Ampères Hypothese ist ein Magnet ein ganzes System elektrischer Elementarströme, welche in parallelen Kreisen um alle Moleküle des magnetischen Körpers kreisen. In diesem Sinne aufgefaßt, ist der die Induktion hervorrufende permanente Magnetstab tatsächlich mit der Spule P identisch.

Die Ursache der Induktionserscheinung nennt man Induktor. Induktor kann also ein elektrischer Strom oder ein permanenter Magnet sein. Der durch die Induktion entstandene Strom heißt induzierter Strom, der Stromkreis, welcher die Induktionserscheinung hervorruft, wird induzierender oder primärer Stromkreis, der den induzierten Strom führende Stromkreis aber induzierter oder sekundärer Stromkreis genannt. Es kann also auch von primären und sekundären Strömen gesprochen werden.

Wir können nunmehr zur weiteren Untersuchung der induzierten Ströme übergehen.

Am Anfange dieses Kapitels sahen wir, daß der induzierte Strom durch das Galvanometer nur dann angezeigt würde, wenn der Stromkreis des primären Stromes geschlossen oder unterbrochen wird. In der Zwischenzeit, während welcher der primäre Strom durch die primären Drahtwindungen

kontinuierlich floß, konnte keine Induktionserscheinung konstatiert werden. Bei Schließen des primären Stromkreises ist der ursprüngliche Wert des primären Stromes Null, dann wächst seine Intensität bis auf jenen Wert hinauf, welcher der Größe der wirkenden elektromotorischen Kraft und des Gesamtwiderstandes des primären Stromkreises entspricht. Während dieses Zeitraumes ist also die Stärke des Stromes veränderlich und fällt die Dauer des induzierten oder sekundären Stromes mit diesem Zeitraume zusammen. Nachher bleibt die Stärke des primären Stromes konstant, auch hört damit die weitere Induktionswirkung auf.

Wird der primäre Strom unterbrochen, dann muß die Stärke des Stromes von seinem obengenannten normalen Werte auf Null sinken. In dieser Zeitperiode ist also die primäre Stromstärke abermals veränderlich, nur im entgegengesetzten Sinne, als bei Schließen des Stromkreises. Nun kann man wieder durch die entgegengesetzte Ablenkung der Galvanometernadel auf das Vorhandensein eines sekundären Stromes schließen.

Aus diesen Ausführungen geht hervor, daß bei der Voltainduktion induzierte Ströme nur dann entstehen können, wenn die Stärke des primären Stromes sich verändert. Nun kann man aber diese Stromstärke durch Verändern von in diesen Stromkreis geschalteten Widerständen beliebig verändern und dadurch Induktionswirkungen hervorrufen, ohne den primären Stromkreis unterbrechen zu müssen. In der Tat finden wir, daß auch bei solcher Durchführung des Versuches Induktionsströme auftreten, weshalb folgendes Gesetz aufgestellt werden kann:

Wird bei der Voltainduktion die Stärke des induzierenden Stromes verändert, entsteht im sekundären Stromkreise ein Strom, dessen Dauer mit der Dauer der Stromstärkeänderung im primären Stromkreise gleich ist.

Dasselbe gilt auch für den Fall, wenn man bei der in Fig. 1 veranschaulichten Versuchsanordnung bei konstanter primärer Stromstärke die Spule P bewegt. Steht die Spule still, oder richtiger ist die relative Bewegung der Spulen P und S Null, hört jede Induktionserscheinung auf. Bei jeder Bewegung der einen Spule entsteht ein induzierter Strom, dessen Dauer mit der Bewegungsdauer der Spule gleich ist.

Fig. 1.

Es ist nun einleuchtend, daß sich diese Verhältnisse nicht ändern, wenn man anstatt der Spule P in der Spule S einen permanenten Magnet bewegt, da die stromdurchflossene Spule P selbst als ein Magnet betrachtet werden kann und umgekehrt.

Betrachten wir während diesen Experimenten die Galvanometernadel, so sehen wir, daß sie bald rechts, bald links von ihrer Ruhelage abweicht. Da dies nur bei veränderten Stromrichtungen geschehen kann, muß der die Wickelung des Galvanometers durchfließende induzierte Strom seine Richtung auch wechseln. Es zeigte sich, daß wenn

der Stromkreis geschlossen oder wenn bei geschlossenem Stromkreise die Stärke des primären Stromes erhöht wurde, die Galvanometernadel immer nach derselben Seite von ihrer Ruhelage auswich, und bei Öffnen oder Schwächen des primären Stromes immer einen der früher erwähnten entgegengesetzten Ausschlag gab. Die Richtung des induzierten Stromes hängt also davon ab, ob der primäre Strom gestärkt oder geschwächt wird, nachdem das Schließen des Stromkreises als eine Verstärkung, das Öffnen aber als eine Abschwächung derselben angesehen werden kann.

Im zweiten Falle sei die Stärke des primären Stromes konstant und sei die primäre Spule in der sekundären beweglich. Wenn man nun die primäre Spule in Fig. 1 in die sekundäre Spule hineinschiebt, entsteht ein induzierter Strom, dessen Richtung gleich jener ist, welche dem Schließen oder dem Verstärken des primären Stromes entspricht. Bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung wechselt auch die Richtung des sekundären Stromes. Aus dem Vorausgesagten folgt zugleich, daß dasselbe auch für die Magnetinduktion gilt.

Zur vollständigen Untersuchung des Induktionsstromes gehört noch die Untersuchung der Richtungen des induzierten, sekundären Stromes. Aus den beschriebenen Experimenten konnte man feststellen, daß die Richtung des induzierten Stromes beim Schließen und Öffnen des induzierenden Stromkreises beziehungsweise bei Nähern und Entfernen des permanenten Magnets oder der stromdurchflossenen Spule sich ändert. Betrachten wir zunächst den Fall, wenn der Stromkreis geschlossen wird, dann zeigt es sich, daß der induzierte Strom eine dem induzierenden Strome entgegengesetzte Richtung hat. Dasselbe ist der Fall, wenn die stromdurchflossene Spule sich der sekundären Spule nähert oder wenn die Stärke des primären Stromes

anwächst. Wird dagegen der primäre Stromkreis unterbrochen, oder die Stromstärke im primären Kreise geschwächt oder endlich die Spule von der sekundären Spule entfernt, dann entsteht ein induzierter Strom, welcher dem Schließungsinduktionsstrom entgegengesetzt ist, d. h. dessen Richtung mit der Richtung des induzierenden Stromes übereinstimmt.

Daß für die Magnetinduktion dieselben Verhältnisse bestehen, ist aus folgenden Ausführungen leicht einzusehen.

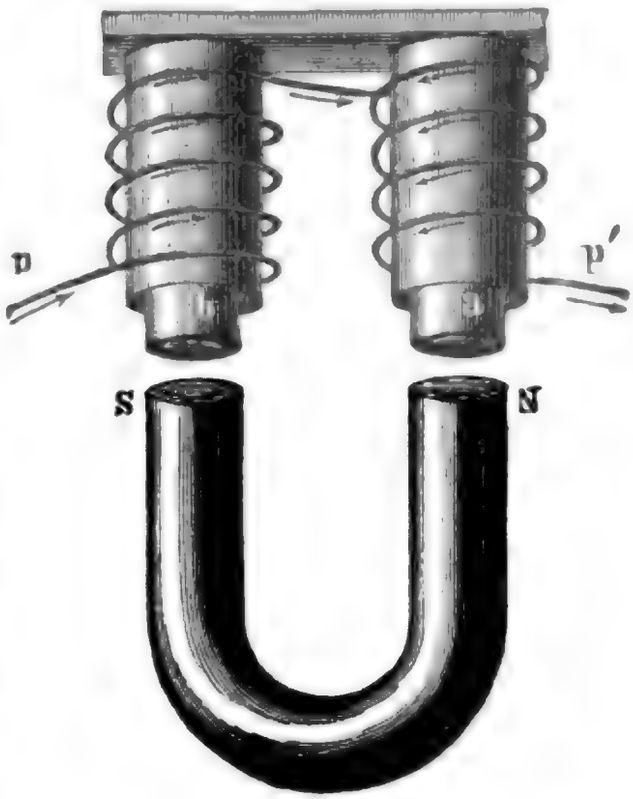


Fig. 2.

In Fig. 2 ist SN ein kräftiger permanenter Magnet. Seinen Polen gegenüberstehen zwei Eisenkerne a und b, auf welche einige Windungen isolierten Kupferdrahtes $p\,p'$ aufgewunden sind. Die Eisenkerne sind mit einem Schlußstück versehen, so daß bei Anlegen des permanenten Magnets an die beiden Eisenkerne ein ununterbrochener magnetischer Kreis entsteht. Wird ein Eisenkern mit Windungen versehen und ihm dann ein Magnet genähert, dann verhält sich der Eisenkern infolge magnetischer Verteilung gerade so als ein permanenter Magnet. Nachdem wie oben gesagt, diesen Eisenkern Windungen umgeben, entstehen bei jeder Annäherung und Enfernung des permanenten Magnets in den Windungen induzierte Ströme, da der Eisenkern bald magnetisch wird und bald seinen Magnetismus verliert.

Die Annäherung des Magnets entspricht jenem Falle, bei welchem in eine Drahtspule ein Magnet eingeführt wird. Der permanente Magnet verhält sich aber gerade so wie die öfters erwähnte stromdurchflossene Spule und daß dann beim Südpole die Stromrichtung mit jener des eingezeichneten Pfeiles übereinstimmen muß, ist einleuchtend.

Nach diesen Ausführungen können wir nun die Richtungen der durch die Magnetinduktion hervorgerufenen induzierten Ströme gerade so bestimmen, als bei einer genäherten und entfernten primären Drahtspule. Wird der Magnet genähert, dann ist die Richtung des induzierten Stromes mit der Richtung des den Magnet ersetzenden Stromes entgegengesetzt, also mit der Richtung des bei *p* liegenden Pfeiles übereinstimmend. Bei der Entfernung des Magnets kehrt auch die Richtung des induzierten Stromes um.

Die bisherigen Untersuchungsresultate zusammengefaßt, entsteht ein Induktionsstrom, wenn:

1. Der primäre Stromkreis geschlossen oder wenn die Stärke des primären Stromes erhöht wird. Die Richtung des sekundären Stromes ist jener des primären entgegengesetzt.

2. Der primäre Strom geschwächt oder der primäre Stromkreis ganz unterbrochen wird. In diesem Falle ist die Richtung der beiden Ströme miteinander übereinstimmend.

3. Dem sekundären Leiterkreise der primäre Stromkreis genähert wird. Richtung des Stromes wie bei 1.

4. Der primäre Stromkreis vom sekundären entfernt wird. Richtung des Stromes wie bei 2.

Mit 3. und 4. ist die Magnetinduktion analog.

Der induzierte Strom zirkuliert also entweder in entgegengesetzter oder in gleicher Richtung mit dem induzierenden Strome. Der sekundäre Strom hat aber auch alle Eigenschaften des primären

Stromes, er erzeugt Wärme im sekundären Stromkreise, es entstehen Licht- und magnetische Wirkungen etc. Uns interessieren vorderhand nur die magnetischen Wirkungen des induzierten Stromes.

Eine jede stromdurchflossene Leitung erzeugt ein magnetisches Feld, dessen Polarität von der Richtung des Stromes abhängt. Ströme von gleicher Richtung rufen dieselbe magnetische Polarität hervor, unterstützen sich also in ihren Wirkungen. Der induzierte Strom hat aber bei Schließen oder Verstärken des primären Stromes eine, dem letzteren entgegengesetzte Richtung, muß also eine solche magnetische Wirkung haben, welche jener des induzierenden Stromes entgegengesetzt ist, mithin muß eine Abschwächung des bereits vorhanden gewesenen magnetischen Feldes stattfinden. Bei einer Disposition, bei welcher der primäre Strom eine bewegliche Spule durchfließt (Fig. 1), hat bei Näherung der Spule zum induzierten Stromkreise eine solche Wirkung stattgefunden, daß der sekundäre Strom die Bewegung der primären Drahtspule hindert. Wenn also im primären Stromkreise der Strom ein solches magnetisches Feld erzeugt, dessen Nordpol nach unten gerichtet ist, dann wird der induzierte sekundäre Strom eine solche Richtung haben, daß der Nordpol des sekundären magnetischen Feldes nach oben gerichtet und demzufolge zwischen den beiden Spulen eine abstoßende oder eine die Bewegung hindernde Kraft tätig sein wird.

Bei Entfernen der primären Spule oder was dasselbe ist, bei Schwächen des primären Stromes ist die induktive Wirkung eine entgegengesetzte. Die Richtung des sekundären Stromes ist jetzt gleich mit der des primären Stromes, die beiden Ströme haben also magnetische Felder von gleichen Richtungen, so daß sich diese gegenseitig verstärken. Die Folge davon wird eine Anziehung der

beiden Spulen sein, oder mit anderen Worten, der induzierte Strom hat eine solche Wirkung, welche die die Induktion verursachende Bewegung hindert.

Die Magnetoinduktion zeigt dasselbe Verhalten. Der Magnet kann immer durch eine stromdurchflossene Spule ersetzt werden und ist das weitere Verhalten in allen Fällen mit jenem bei zwei beweglichen Spulen konstatierten identisch.

Betrachten wir näher den Fall, wenn beide Leitungen auf dieselbe Spule gewickelt sind. Wird der Strom im primären Kreise verstärkt, oder wird der primäre Stromkreis geschlossen, dann entsteht neben der Induktionswirkung auch ein primäres, magnetisches Feld. Der induzierte Strom hat aber eine, dem induzierenden Strome entgegengesetzte Richtung, ruft also ein magnetisches Feld hervor, dessen Polarität mit der Polarität des ersten entgegengesetzt ist. Wenn also die beiden Leiterkreise unbeweglich sind und eine Induktionswirkung nur durch die Veränderung des primären Stromes entstehen kann, dann äußert sich die frühere bewegungshindernde Wirkung des induzierten Stromes darin, daß das Entstehen des primären magnetischen Feldes verzögert wird. Bei Öffnen des primären Stromkreises ist die Richtung des sekundären Stromes mit der des primären gleich, die primären und sekundären magnetischen Wirkungen unterstützen sich also, d. h. das Verschwinden des bereits vorhandenen magnetischen Feldes wird durch den induzierten Strom zu verhindern gesucht.

Aus allen diesen Ausführungen geht hervor, daß die Tendenz des induzierten Stromes immer eine hindernde ist, und äußert sich diese immer darin, daß der induzierte Strom durch seine Wirkungen stets die bereits vorhandenen Verhältnisse aufrecht zu erhalten trachtet. Wird die bewegte Spule zum Stillstand gebracht, will der induzierte Strom dies hemmen, wird die Spule oder der Magnet

bewegt, dann trachtet der induzierte Strom dies zu verhindern und den Induktor in seinem ursprünglichen Zustand zu verharren, nötigen versuchen.

Das Gesetz der Induktion hat Lenz aufgestellt. Nach demselben sucht der durch Bewegung oder Stromschwankungen hervorgerufene induzierte Strom die Bewegung zu hemmen, beziehungsweise die Änderung der Stromstärke zu verhindern.

Wir haben bisher die Induktionserscheinungen stets als Wirkungen von Strömen auf Leiterkreise definiert, man kann sie jedoch auch noch in einer anderen Weise erläutern, nämlich mit Hilfe der magnetischen Kraftlinien. Dieser Begriff erlaubt eine übersichtlichere und leichtere Behandlung aller Induktionserscheinungen und bildet den Grund der heutigen modernen Auffassung sowohl über die Volta- als auch über die Magnetinduktion.

Der Begriff der Kraftlinien wurde von Faraday eingeführt. Ein jeder Magnet hat ein magnetisches Feld, dessen Intensität um so kleiner wird, je weiter man vom magnetischen Pole geht. Befindet sich im magnetischen Felde eine magnetische Masse, dann wirkt auf diese eine anziehende oder abstoßende Kraft, je nachdem die Polarität der magnetischen Masse mit der Polarität des, das magnetische Kraftfeld erzeugenden Poles entgegengesetzt oder gleichnamig ist.

Die Größe der wirkenden Kraft hängt von der kürzesten Entfernung der Masse vom Pole ab, und zwar nimmt bei zunehmender Entfernung die Kraft im quadratischen Verhältnisse mit der Entfernung ab und ist mit den magnetischen Massen proportional. Je weiter also die magnetische Masse vom Pole liegt, desto kleiner wird die auf sie wirkende Kraft und erreicht im Unendlichen den Wert Null. Nachdem aber die wirkende Kraft mit der Entfernung rasch abnimmt, wird die Intensität des magnetischen Feldes schon in kurzer Entfernung

vom Pole gering sein, weshalb man die Wirkungen des Poles über eine gewisse Grenze vernachlässigt und so dem magnetischen Felde eine praktische Grenze gibt.

Betrachtet man einen geraden Magnetstab (Fig. 3) und bringt in das durch diesen erzeugte magnetische Feld einen Einheitspol, so wird dieser den wirkenden Kräften nachgeben und eine bestimmte Kurve beschreibend, im Raume von einem Pole zum anderen sich bewegen. Dieser Einheitspol ist längs seines ganzen Weges magneti-

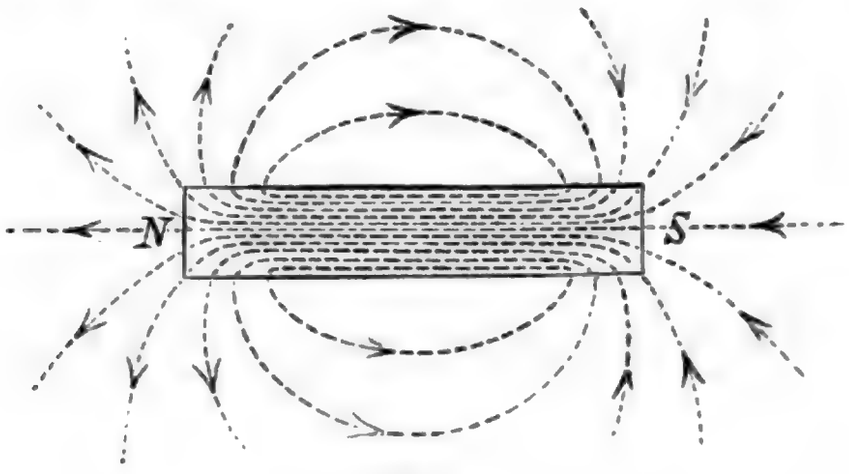


Fig. 3.

schen Kräftewirkungen ausgesetzt, welche stets tangential zur Bewegungsbahn liegen. Die beschriebene Bahn ist die sogenannte Kraftlinie. Die Kraftlinien sind also im allgemeinen solche Kurven, bei denen in jedem Punkte die Richtung der wirkenden Kraft durch die, zum fraglichen Punkte gehörende Tangente gegeben ist. In Fig. 3 treten die in der Papierebene liegenden Kraftlinien vom Nordpole aus und verlaufen in verschiedenen Kurven, um dann wieder beim Südpole vereint in den Eisenkern des Magnetes einzutreten.

Die Intensität des magnetischen Feldes in einem gegebenen Punkte ist durch jene Kraft ausgedrückt, welche im fraglichen Punkte auf die Einheit der magnetischen Masse wirkt. Nachdem aber die Kraft-

linien den ganzen Raum, also das ganze magnetische Feld ausfüllen, kann die Intensität des Feldes durch die Menge jener Kraftlinien gemessen werden, welche im gegebenen Punkte die Flächeneinheit durchsetzen. In diesem Sinne kann von der Anzahl der Kraftlinien die Rede sein, und wenn man in Fig. 3 den Verlauf der Kraftlinien beobachtet, dann sieht man, daß diese in der Nähe der Pole dichter verlaufen, als anderwo im magnetischen Felde. Hieraus folgt, daß die Intensität des magnetischen Feldes um so größer ist, je mehr Kraftlinien die Flächeneinheit durchsetzen oder aber je näher die Fläche zum Pole liegt.

Ein magnetisches Feld bedingt demnach notwendigerweise immer das Vorhandensein magnetischer Kraftlinien. Je dichter diese im Raume verlaufen, desto stärker ist das magnetische Feld, oder was dasselbe bedeutet, desto stärker ist der das magnetische Feld hervorrufende magnetische Pol.

Die in den obigen Ausführungen besprochenen Verhältnisse bestehen in einem jeden magnetischen Felde, unabhängig von der Natur der das Feld hervorbringenden Ursache. Nachdem aber ein solches Kraftfeld nicht nur durch einen permanenten Magnet, sondern auch durch einen elektrischen Strom, infolge seiner magnetisierenden Wirkung, entstehen kann, müssen wir auch untersuchen, was der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Strom und dem durch ihn verursachten magnetischen Felde ist.

Fließt ein Strom durch einen linearen Leiter, dann entsteht längs diesem Leiter ein magnetisches Feld. Die Verteilung der wirkenden Kräfte im Raume hängt von der Gestalt und der Lage des Leiters ab. Ist in der Nähe des Leiters ein anderer stromdurchflossener Leiter, dann entsteht durch die gegenseitige Wirkung beider Ströme ein resultierendes magnetisches Feld, dessen Stärke von den Stromrichtungen abhängt.

Die Kraftlinien dieses magnetischen Feldes sind konzentrische Kreise, deren gemeinsamer Mittelpunkt in der Achse des Leiters liegt (Fig. 4). Der Verlauf der Kraftlinien kann auch demonstriert werden, indem man ein Blatt Papier horizontal auf den Leiter befestigt und dann bei fortwährendem Rütteln kleine Eisenfeilspäne darauf streut. Fließt der Strom in der durch den Pfeil angegebenen Richtung, dann entstehen die Kraftlinien auf der Fläche MN in den auf der Figur angedeuteten konzentrischen Kreisen.

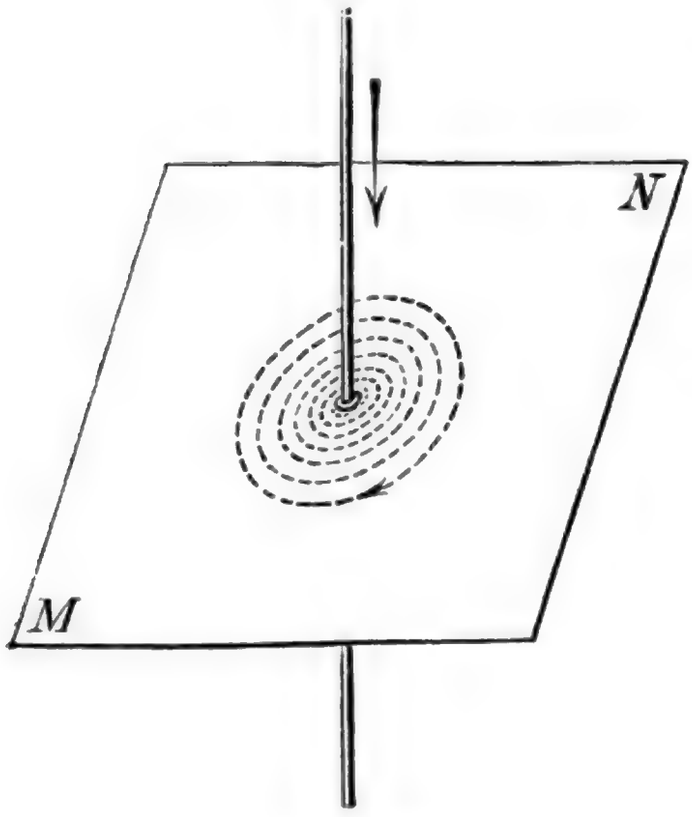


Fig. 4.

Die Wirkung kann wesentlich gesteigert werden, wenn der Leiter kreisförmig ist. In diesem Falle treten die Kraftlinien auf einer Seite aus der Kreisfläche heraus und dringen auf der anderen Seite in dieselbe hinein, d. h. ein kreisförmiger und vom Strome durchflossener Leiter verhält sich gerade so, als ein sehr flacher, permanenter Magnetstab. Wenn der Leiter dann noch in mehreren Windungen und Lagen einen Eisenkern umschließt, wird die Gesamtwirkung die Summe der Wirkungen der einzelnen Windungen sein, welche noch durch das Vorhandensein des Eisenkernes beträchtlich verstärkt wird und es entsteht der Elektromagnet.

Die Richtung der so entstandenen Kraftlinien oder die Polarität des elektromagnetischen Feldes

hängt von der Stromrichtung ab. Den einfachsten Fall, jenen des linearen Leiters (Fig. 4) betrachtend, entstehen die Kraftlinien in MN in solcher Richtung, daß ein ganz frei beweglicher magnetischer Nordpol sich im Sinne der Uhrzeigerbewegung bewegen würde, wenn der Strom im Leiter in der Richtung des Pfeiles strömt. Denken wir nun den Leiter nach rechts umgebogen, dann entsteht ein resultierendes Feld, bei welchem die Kraftlinien alle aus der Kreisfläche austreten. In diesem Falle hat das magnetische Feld des Drahtkreises auf der dem Leser zugekehrten Seite eine nordmagnetische Polarität. Wechselt der Strom seine Richtung, dann verlaufen auch die Kraftlinien in entgegengesetzter Richtung und es entsteht auf der vorderen Kreisfläche eine südmagnetische Polarität.

Wenn die Richtung des Stromes in einem Drahtkreise der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt ist, dann entsteht auf der dem Betrachter zugewendeten Seite der Kreisfläche ein Nordpol, fließt der Strom im Sinne der Uhrzeigerbewegung, so ist dieselbe Kreisfläche südmagnetisch polarisiert.

Für den Verlauf der Kraftlinien um einen geraden Leiter hat Maxwell eine Regel aufgestellt, laut welcher die Richtung der Kraftlinien mit Hilfe der Bewegungsrichtungen eines Korkziehers bestimmt werden können. Fließt der Strom in einer Richtung im Leiter, welche dem Vorwärtsbewegen des Korkziehers entspricht, dann verlaufen die entstehenden Kraftlinien gerade so, wie der Korkzieher gedreht wird, also im Sinne der Uhrzeigerbewegung.

Auch kann die Polarität eines Elektromagneten aus der Stromrichtung durch Ampères Regel bestimmt werden:

Denkt man sich im Leiter in der Richtung des Stromes schwimmend, das Gesicht dem Eisenkerne

zugekehrt, dann entsteht der Nordpol auf der Seite der linken Hand.

Sehen wir nun, wie läßt sich die Gegenwirkung zwischen dem elektrischen Strome und dem durch ihn hervorgerufenen magnetischen Felde mit Hilfe der magnetischen Kraftlinien ausdrücken.

Sobald ein Strom durch einen Leiter fließt, entstehen Kraftlinien, folglich müssen Kraftlinien im Sinne des Gesetzes der Gegenwirkung unter geeigneten Umständen auch Ströme erzeugen können, d. h. induzierend wirken. Es liegt nahe, daß in einem Leiter, welcher in einem entstehenden magnetischen Felde liegt, Ströme induziert werden müssen, da ein entstehendes magnetisches Feld dieselbe Wirkung ausübt, als ein dem Leiter genähertes Feld, welches bei der Magnetinduktion der Fall ist. Wird der Strom unterbrochen, dann verschwindet das magnetische Feld, was dann jenem Falle entspricht, wenn bei der Magnetinduktion der permanente Magnet rasch entfernt wird.

Die Richtung des induzierten Stromes läßt sich auch genau präzisieren, wenn man das Gesetz von Lenz in Anbetracht zieht. Wir sahen, daß der induzierte Strom immer die Tendenz hat, die Bewegung zu hemmen, in vorliegendem Falle wird die Stromrichtung im sekundären Kreise eine solche sein, daß der induzierte Strom bei Schließen des primären Stromes das Entstehen der Kraftlinien zu verhindern sucht, bei Öffnen dagegen das vorhandene Feld aufrecht erhalten will. Wenn nun der primäre Stromkreis geschlossen wird, dann erzeugt der sekundäre Strom den durch den primären Strom hervorgerufenen Kraftlinien entgegengesetzte Kraftlinien, d. h. die Richtung des induzierten Stromes ist der des induzierenden entgegengesetzt. Bei Unterbrechen des primären Stromkreises verschwinden die Kraftlinien, der sekundäre Strom hemmt aber dies, und erzeugt gleichgerichtete

Kraftlinien. weshalb der induzierte Strom in diesem Falle dem induzierenden Strome gleichgerichtet ist.

Dasselbe geschieht, wenn bei geschlossenem Stromkreise die Intensität des primären Stromes wächst, beziehungsweise sinkt. Eine jede Stromschwankung ruft daher induzierte Ströme hervor.

Wir sehen also, daß bei einer jeden Induktionserscheinung die Anzahl der Kraftlinien sich ändern muß, denn die Bewegung der stromdurchflossenen Spule wechselt eigentlich auch nur die Anzahl der durch die Windungen der sekundären Spule umschlossenen Kraftlinien.

Die Induktionswirkung ist eine gegenseitige, d. h. es kommt sich gleich, ob sich die primäre Spule bewegt und die sekundäre steht oder umgekehrt, denn nur die relative Bewegung ist von Wirkung. Bewegen sich also beide Spulen mit gleicher Geschwindigkeit in derselben Richtung, dann ist die Induktionswirkung Null, bewegen sie sich aber in entgegengesetzten Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit, dann wird eine doppelt so große Induktionswirkung stattfinden, als wenn sich eine Drahtspule in Ruhe befände.

Ebenso wie bei einer bewegten Spule oder einem Magnet die Größe der Geschwindigkeit auf die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft Einfluß hat, so hängt auch diese von jener Geschwindigkeit ab, mit welcher die Kraftlinien entstehen oder verschwinden. Je stärker der induzierende Strom oder der permanente Magnet ist, um so stärker wird der induzierte Strom, oder aber je größer die Anzahl der in der Zeiteinheit verschwindenden oder entstehenden Kraftlinien ist, desto intensiver wird die Induktionswirkung sein.

Alles zusammengefaßt sehen wir, daß die induzierte elektromotorische Kraft in einem Leiterkreise um so größer wird, je größer die Anzahl der entstehenden oder verschwindenden Kraftlinien ist,

und je größer die Geschwindigkeit, mit welcher diese sich verändert.

Was die Gestalt des Leiters betrifft, unterscheidet man in bezug auf die Induktionserscheinungen zwei Fälle und zwar:

1. Induktion in linearen Leitern und
2. Induktion in körperlichen Leitern.

Lineare Leiter nennt man solche Leiter, bei welchen die Länge im Verhältnis zum Querschnitt groß ist. Solche sind z. B. die Drähte.

Die Induktion in körperlichen Leitern war schon vor 1831, dem Jahre der Entdeckung der Induktion durch Faraday, bekannt, doch erkannte man das Wesen dieser Erscheinung in jener Zeit nicht und stellte zur Erklärung derselben verschiedene Hypothesen auf. Man nannte es Rotationsmagnetismus; mit der Erscheinung werden wir uns später eingehender befassen.

Aus den bisherigen Ausführungen lassen sich jene Bedingungen feststellen, von welchen die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft abhängt.

Das magnetische Feld ist eine Funktion der erregenden Stromstärke und der Anzahl der Drahtwindungen. Nachdem aber die Stromstärke in Ampère gemessen wird, sagt man auch, daß die Intensität des erzeugten magnetischen Feldes von der Anzahl der Ampèrewindungen abhängt. Umgekehrt steht dies vom induzierten Stromkreis. Je größer die Anzahl der verschwindenden oder entstehenden Kraftlinien ist, um so größer wird die dem sekundären Strom entsprechende Ampèrewindungszahl, oder aber, nachdem die Anzahl der sekundären Windungen konstant ist, die Stärke des induzierten Stromes.

Der induzierte Strom wird demnach stärker, wenn die primären Ampèrewindungen größer sind. Bei gegebener maximaler induzierender Stromstärke kann man also den induzierten Strom verstärken,

wenn man die primären Drahtwindungen vermehrt, nachdem dadurch die Anzahl der Ampèrewindungen vergrößert wird.

Die Verstärkung des magnetischen Feldes bei derselben Ampèrewindungszahl kann auch dadurch erfolgen, daß man einen Eisenkern verwendet, da die magnetische Durchlässigkeit, die Permeabilität, des Eisens viel größer als die der Luft ist, und demzufolge bei vorhandenem Eisenkerne der Gesamtwiderstand des magnetischen Kreises sich vermindert. Wird also bei dem Induktionsapparate ein Eisenkern verwendet, dann sind die induzierten Ströme viel stärker als bei derselben induzierenden Stromstärke ohne Eisen.

Die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft können wir sowohl bei der Volta- als bei der Magnetinduktion bestimmen, wenn wir die Ursache in beiden Fällen, in der Wechselwirkung eines stromdurchflossenen Leiters und eines Magnetes suchen. Dies kann geschehen, da wie bereits gezeigt, eine stromdurchflossene Spirale immer als ein permanenter Magnet aufgefaßt werden kann.

In erster Reihe müssen wir die Gesamtzahl der durch eine bestimmte Fläche durchgehenden Kraftlinien kennen. Die Intensität des magnetischen Feldes in einem gegebenen Punkte ist durch die Anzahl jener Kraftlinien gegeben, welche im fraglichen Punkte die Flächeneinheit durchsetzen.

Nachdem im allgemeinen die Intensität des magnetischen Feldes veränderlich ist, nehmen wir eine differentiale Fläche ds in Betracht. Wenn die diesem Punkte entsprechende Feldintensität mit B bezeichnet wird, dann ist die Anzahl der durch ds gehenden Kraftlinien

$$dN = B\,ds.$$

Ist die Größe der zu untersuchenden Fläche s, dann wird die gesuchte gesamte Kraftlinienzahl

durch die Formel

$$N = \int B\,ds$$

gegeben sein.

Nach Faraday ist in einem Leiter die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft gleich der durch den Leiter in einem Zeitmomente geschnittenen Anzahl der Kraftlinien, also

$$e = \frac{dN}{dt}$$

wo dt einen differentalen Zeitraum bedeutet.

Elektromotorische Kraft kann nicht nur durch Verschwinden und Entstehen der Kraftlinien induziert werden, sondern auch dadurch, daß der Leiter sich im magnetischen Felde bewegt, also gewissermaßen Kraftlinien schneidet. In solchem Falle ist die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft von der Länge des Leiters, der Stärke des magnetischen Feldes und jener Geschwindigkeit abhängig, mit welcher der Leiter die Kraftlinien schneidet.

Hat der Leiter die Länge l und bewegt er sich in einem magnetischen Felde von der Intensität B mit der Geschwindigkeit v, dann ist die Zahl der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien

$$N_1 = l \,.\, B \,.\, v$$

und die induzierte elektromotorische Kraft e_1

$$e_1 = l\,B\,v$$

wobei vorausgesetzt war, daß das magnetische Feld gleichmäßig und die Geschwindigkeit des Leiters konstant ist. Wenn dies nicht der Fall, dann ist e_1 durch eine Integralformel gegeben.

Die Intensität des induzierten Stromes hängt von der Größe der elektromotorischen Kraft und

Digitized by Google

des Gesamtwiderstandes des sekundären Leiterkreises ab. Bezeichnen wir die Stromstärke mit i, den Gesamtwiderstand mit r, dann ist:

$$i = \frac{e}{r} = \frac{N}{r} = \frac{\int B\,ds}{r}$$

beziehungsweise

$$i_1 = \frac{e_1}{r} = \frac{l\,B\,v}{r}$$

Die bisher abgeleiteten Formeln haben nur dann Giltigkeit, wenn der Leiter die Kraftlinien in senkrechter Richtung schneidet. Ist dies nicht der Fall, sondern bildet der Leiter mit der auf die Kraftlinien senkrechten Richtung $x—x$ den Winkel α (Fig. 5), dann ist bei der Induktion nur jene Länge in Rechnung zu ziehen, welche durch Projektion der Leiterlänge auf die besagte senkrechte Richtung sich ergibt. Ist die Länge des Leiters l, dann wird die Projektion l_1

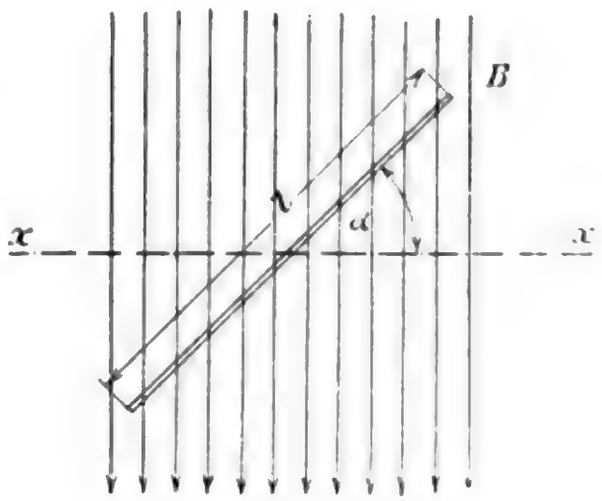


Fig. 5.

$$l_1 = l \cos \alpha$$

sein und die induzierte elektromotorische Kraft bei den obigen Verhältnissen:

$$e = B\,v\,l \cos \alpha = B\,v\,l_1$$

Nun wird die Stromstärke in der oben angegebenen Weise berechnet.

Digitized by Google

In derselben Weise, als ein stromdurchflossener Leiter auf einen anderen Leiter induzierend wirkt, wirken auch die einzelnen Teile eines Leiters aufeinander. Diese Erscheinung ist die sogenannte Selbstinduktion. Bei allen Induktionserscheinungen sahen wir, daß die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft von der gegenseitigen Lage der Leiterkreise abhing, gerade so sind die Verhältnisse bei der Selbstinduktion.

Wenn durch einen Leiter ein konstanter Strom von der Intensität i fließt, dann entstehen Kraftlinien, deren Anzahl der Stromstärke proportional ist, d. h.

$$N = L\,i$$

L ist eine Konstante, deren Größe von der Gestalt des Leiters abhängt.

Wird der Stromkreis unterbrochen oder verändert sich aus irgend einer Ursache die Intensität des elektrischen Stromes, dann verschwinden die Kraftlinien, beziehungsweise verändert sich deren Anzahl und es entsteht die Erscheinung der Selbstinduktion. Jeder Induktionserscheinung entspricht eine induzierte elektromotorische Kraft, deren Richtung der induzierenden entgegengesetzt ist, weshalb auch die durch die Selbstinduktion hervorgerufene induzierte elektromotorische Kraft als eine gegenelektromotorische Kraft bezeichnet wird.

Wenn in obiger Gleichung $i = 1$, d. h. wenn die durch den Leiter fließende Stromstärke die Einheit ist, dann wird

$$N_1 = L$$

oder L ist jene Anzahl Kraftlinien, welche durch die Einheit der Stromstärke hervorgerufen wird. Dies nennt man den Selbstinduktionskoeffizienten des Leiters. Die Größe der Selbstinduktion eines

Digitized by Google

Leiters ist demnach um so größer, je mehr Kraftlinien die Stromstärkeeinheit hervorbringen kann. Nachdem wie bereits gezeigt, die Anzahl der Kraftlinien eine Funktion der Ampèrewindungen ist, wird die Selbstinduktion einer Spule um so größer sein, je mehr Windungen sie besitzt.

Die Erscheinung der Selbstinduktion entsteht nur dann, wenn die Intensität des Stromes sich verändert. Hieraus folgt, daß bei Schließen des Stromkreises die Selbstinduktion nur solange andauert, bis die Stromstärke ihren konstanten Wert erreicht hat. Bei Schließen des Stromkreises ist die Richtung der Gegenkraft der Selbstinduktion der induzierenden elektromotorischen Kraft entgegengesetzt, sie vergrößert also gewissermaßen den Widerstand des Leiterkreises und die Stromstärke kann nur allmählich ihren normalen Wert erreichen. Unterbricht man den Stromkreis, dann verschwinden die bereits vorhanden gewesenen Kraftlinien und es entsteht eine elektromotorische Kraft, deren Richtung mit der verschwindenden übereinstimmt. In diesem Falle vermindert sich also der resultierende Widerstand des Stromkreises, die Stromstärke wird durch die gleichgerichtete elektromotorische Kraft der Selbstinduktion aufrecht zu erhalten getrachtet, und es entsteht ein intensiver Öffnungsfunke an der Unterbrechungsstelle.

Der Wert des Selbstinduktionskoeffizienten hängt von der Gesamtzahl der Kraftlinien oder auf die Flächeneinheit bezogen, von der Intensität des magnetischen Feldes ab. Die letztere hängt anderseits vom Gesamtwiderstande des magnetischen Kreises ab, wenn also ein Eisenkern im Leiterkreise vorhanden ist, dann wird die Selbstinduktion auch größer sein.

Bei diamagnetischen Materialien ist die Anzahl der hervorgerufenen Kraftlinien der erregenden Stromstärke proportional, bei solchen ist also der

Digitized by Google

Selbstinduktionskoeffizient konstant. Bei Eisen und anderen paramagnetischen Materialien besteht nicht diese Proportionalität und L verändert sich mit der Permeabilität.

Nach alledem können wir die Gegenkraft der Selbstinduktion mit Hilfe des Selbstinduktionskoeffizienten folgendermaßen ausdrücken

$$e = L \frac{di}{dt}$$

wo di die differentiale Variation der Stromstärke während der unendlich kurzen Zeit dt bedeutet, vorausgesetzt, daß L konstant, also das Material diamagnetisch ist.

Den durch die Selbstinduktion hervorgerufenen Strom nennt man nach Faraday Extracurrent, Gegenstrom oder Extrastrom.

Die elektromotorische Kraft des Extrastromes ist um so größer, je mehr Elemente des Leiters der induzierenden Wirkung ausgesetzt sind. Lineare, lange Drähte besitzen auch einen Selbstinduktionskoeffizienten, doch ist dieser viel kleiner, als wenn derselbe Draht auf eine Rolle aufgewickelt und diese mit einem Eisenkerne versehen ist. Die Gegenkraft der Selbstinduktion ist der Windungszahl und der Stromstärke proportional und ist bei Stromschwankungen um so größer, je rascher diese Stromveränderungen vor sich gehen.

Die Selbstinduktionserscheinung ist besonders bei Wechselströmen von großer Bedeutung, da bei diesen die induzierende Stromstärke stark und rasch wechselt und demzufolge alle Bedingungen erfüllt, welche zur Entstehung einer wirksamen gegenelektromotorischen Kraft nötig sind. Wir werden uns später, bei den Wechselstromerscheinungen, mit der Selbstinduktion eingehender befassen, untersuchen wir jetzt einen anderen Fall der Induktion, nämlich jenen, bei welchem die elektromotorische

Digitized by Google

Kraft dadurch erzeugt wird, daß eine in sich geschlossene Drahtwindung in einem homogenen magnetischen Feld sich bewegt.

In Fig. 6 ist *a* ein Drahtring, welcher sich um eine auf die Papierebene vertikale Achse *A* dreht. Das magnetische Feld ist homogen, d. h. ihre Intensität ist überall im Raume konstant. In Wirklichkeit kann man ein ganz homogenes magnetisches

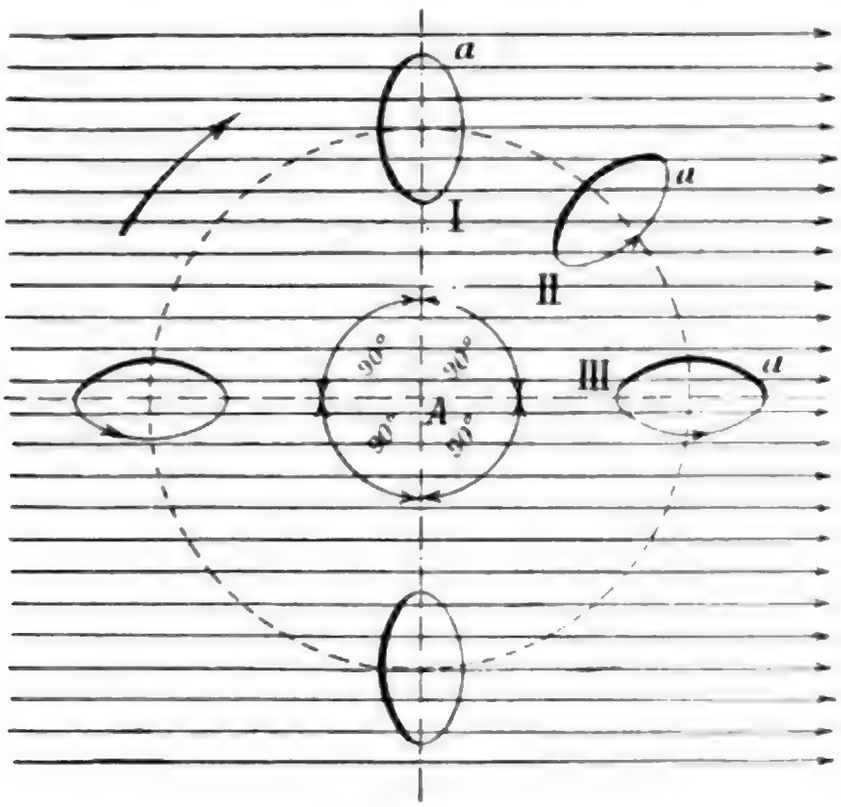


Fig. 6.

Feld nicht herstellen, manchmal aber betrachtet man im beschränkten Ausmaße ein Feld als homogen. Dies ist der Fall bei dem magnetischen Felde der Erde, wenn wir uns nur auf einen solchen Teil derselben beschränken, welcher im Verhältnis zur Erdoberfläche verschwindend klein ist. In einem solchen homogenen magnetischen Felde drehe sich obiger Drahtring mit konstanter Geschwindigkeit in der durch den Pfeil angegebenen Richtung.

In der Lage I umfaßt der Drahtring eine bestimmte Anzahl Kraftlinien, welche als maximal

bezeichnet werden kann, da die Ebene des Ringes senkrecht auf die Richtung der Kraftlinien steht. Dreht sich nun der Ring um einen bestimmten Winkel (Lage II) in der angegebenen Richtung, dann vermindern sich die seine Fläche durchsetzenden Kraftlinien und es entsteht ein induzierter Strom. Nachdem die Wirkung des induzierten Stromes der die Induktion hervorrufenden Ursache immer entgegengesetzt ist, kann die Richtung desselben leicht bestimmt werden. In der Lage II verminderten sich die Kraftlinien in ihrer Anzahl, der induzierte Strom wird also eine solche Wirkung entfalten, welche dieser Verminderung entgegenarbeitet, d. h. welche die Kraftlinien zu vermehren sucht. Der Strom muß demnach aus der Richtung des Verlaufes der Kraftlinien gesehen, der Uhrzeigerbewegung gleichgerichtet fließen, denn nur bei dieser Stromrichtung ist es möglich, daß die Kraftlinien durch den Strom vermehrt werden. Der Induktionsstrom dauert in diesem Falle nur solange als die Bewegung, mit Aufhören der letzteren verschwindet auch der erste.

Eine andere bemerkenswerte Lage des Drahtringes ist jene, bei welcher seine Ebene mit den Kraftlinien parallel wird. In diesem Falle ist die durch den Ring umschlossene Fläche von keiner Kraftlinie durchsetzt. Wir haben also jetzt die Anzahl der Kraftlinien betreffend mit einem Minimum zu tun.

Bei der Lage III hat der Ring in bezug auf seine Anfangslage schon eine Drehung über 90° gemacht, und demzufolge sind auch die Verhältnisse andere. Während nämlich bis 90° Drehung die Kraftlinien aus dem Drahtringe allmählich verschwanden, ist jetzt gerade das entgegengesetzte der Fall, die Kraftlinien vermehren sich um so mehr, je näher der Ring zur senkrechten Lage zu stehen kommt.

Digitized by Google

Die Richtung des induzierten Stromes ist jener während der ersten Periode der Bewegung entgegengesetzt, denn nur bei dieser Richtung können solche Kraftlinien entstehen, welche den bereits vorhandenen entgegengesetzt sind, welche also gewissermaßen die Vergrößerung der umschlossenen Kraftlinienzahl verhindern.

Wir sehen, daß im Drahtringe nur dann ein elektrischer Strom entstehen kann, wenn sich die Zahl der Kraftlinien ändert. Ist die Bewegung eine solche, daß die Zahl der umschlossenen Kraftlinien abnimmt, dann ist der Verlauf des induzierten Stromes, in der Richtung der Kraftlinien betrachtet, eine der Uhrzeigerbewegung gleichgerichtete; nimmt die Zahl der Kraftlinien zu, dann fließt der Strom in der entgegengesetzten Richtung.

Was die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft betrifft, ist diese bei gleichförmiger Bewegung des Drahtringes maximal, wenn die Fläche desselben parallel mit den Kraftlinien liegt, denn in diesem Falle wird die Veränderung in der Anzahl der Kraftlinien eine maximale sein. Ist die Fläche des Ringes auf die Richtung der Kraftlinien senkrecht, dann ist die entstehende elektromotorische Kraft minimal.

Wir werden diese Verhältnisse bei den Wechselströmen eingehender studieren. hier sei nur kurz auf ihr Wesen hingedeutet und ihr Verhalten, insoferne sie die Induktionsgesetze unmittelbar berühren, behandelt.

Wann findet eigentlich die Umkehr der Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft statt? Wir sahen, daß bei Abnahme der Kraftlinienzahl im Ringe der Strom und demnach auch die induzierte elektromotorische Kraft in der Richtung der Uhrzeigerbewegung entstehen, wenn man den Drahtring in der Richtung des Verlaufes der Kraftlinien betrachtet. Nach 90° Drehung ist aus derselben

Richtung betrachtet die Richtung des Stromes jener der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt, in der Wirklichkeit findet aber eine Umkehr nicht statt, denn wir dürfen nicht vergessen, daß nach 90° Drehung dem Auge die andere Seite der Fläche des Ringes sich zuwendet und demnach die Stromrichtung im Ringe notwendigerweise dieselbe bleiben muß. Würde die Richtung eine umgekehrte sein, dann flöße der Strom in der zweiten Periode der Bewegung, aus der Richtung des Verlaufes der Kraftlinien betrachtet, nicht der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt, sondern mit derselben gleichgerichtet, was aber unmöglich ist.

Eine Umkehr kann daher nur dann eintreten, wenn der Ring dieselbe Lage zu den Kraftlinien hat, als am Anfange der Bewegung, d. h. wenn sie wieder senkrecht auf die Kraftlinien steht, jedoch, nachdem bereits eine Drehung von 180° stattgefunden haben muß, ihr oberer Teil nach unten zu stehen kommt. Von dieser Lage angefangen wiederholen sich die früheren Induktionserscheinungen im entgegengesetzten Sinne. In der Lage nach 270° Drehung, vom Nullpunkte aus gerechnet, ist die Fläche des Drahtringes mit den Kraftlinien parallel, die induzierte elektromotorische Kraft maximal, da die Änderung der Kraftlinienzahl in der Zeiteinheit, gleichmäßige Winkelgeschwindigkeit vorausgesetzt, die möglichst größte ist. Die Induktionswirkung nimmt dann wieder stetig ab und ist nach 360° Drehung, d. h. in der Anfangslage des Ringes, wieder Null. Während einer Umdrehung also ist die induzierte elektromotorische Kraft im Drahtringe zweimal Null und zweimal maximal, und sind diese Maximalwerte einander gleich, jedoch ist ihr Vorzeichen entgegengesetzt.

Bisher betrachteten wir den Fall, daß sich der Ring um eine auf die Richtung der Kraftlinien senkrechte Achse dreht. Diese Achse war außer der

Digitized by Google

Ebene des Drahtringes gelegen. Betrachten wir nun jene Disposition, bei welcher die Achse zwar auch senkrecht zu den Kraftlinien steht, jedoch nicht außerhalb der Fläche des Ringes liegt, sondern dasselbe durchsetzt (Fig. 7).

A — A ist die Drehungsachse, welche den Drahtring in zwei symmetrische Hälften teilt. Die Anfangslage sei x — x. Dreht sich der Ring in der angegebenen Richtung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit, dann vermindern sich die ihre

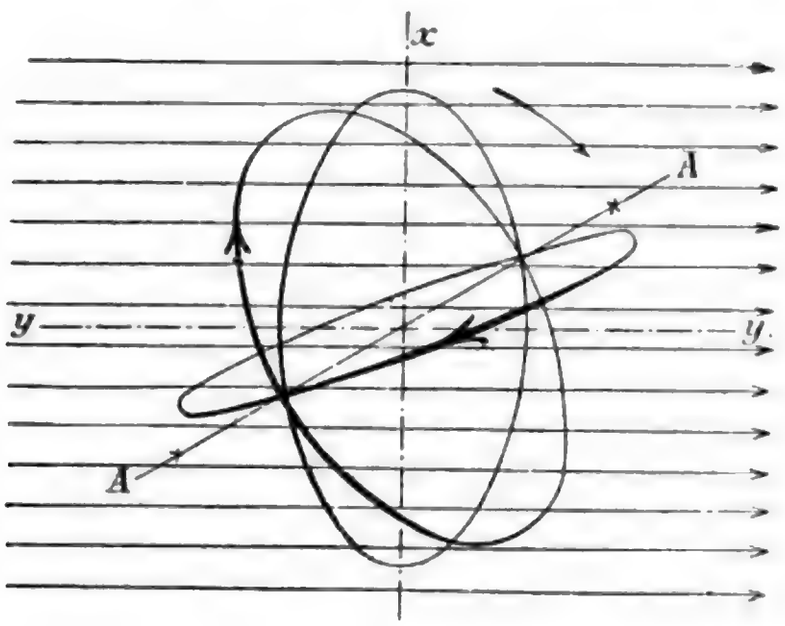


Fig. 7.

Fläche durchsetzenden Kraftlinien und es entsteht ein der Uhrzeigerbewegung gleichgerichteter Strom, wenn man den Ring in der Richtung des Verlaufes der Kraftlinien betrachtet. Nach 90° Drehung ist die Ebene des Ringes zu den Kraftlinien parallel, d. h. die Zahl der sie durchsetzenden Kraftlinien ist Null und demnach die induzierte elektromotorische Kraft, dem früheren Falle analog, maximal. Die übrigen Verhältnisse stimmen auch mit jenen der früher behandelten Disposition überein. Sobald die Ebene des Ringes in die Lage x — x kommt, ist die induzierte elektromotorische Kraft Null, es

findet eine Umkehr der Stromrichtung im Ringe statt. In der Lage $y - y$ ist die induzierte elektromotorische Kraft immer ein Maximum.

Die Induktionserscheinungen bleiben dieselben, wenn die Achse $A - A$ mit der Richtung $x - x$ zusammenfällt. Würde die Achse mit $y - y$ zusammenfallen, dann könnte man bei der Drehung des Drahtringes überhaupt keine Induktionswirkung konstatieren, denn in diesem Falle bleibt die Ebene des Ringes mit den Kraftlinien immer parallel, unabhängig davon, ob sich der Ring dreht oder nicht. Die Bewegung ruft in diesem speziellen Falle also keine Induktionswirkung hervor, trotzdem der Ring im magnetischen Felde sich befindet.

In der früher behandelten Anordnung (Fig. 6) wäre eine Induktionswirkung dann nicht zu konstatieren, wenn sich der Drahtring seiner ursprünglichen Lage parallel verschieben würde, d. h. wenn die Achse A sich in der Unendlichen befände. Bei unendlich langem Radius geht die Kreisbewegung in eine geradlinige Bewegung über und es findet keine Drehung, sondern eine Verschiebung des Drahtringes statt. Bei homogenem Felde ist aber die Kraftlinienzahl überall dieselbe, so daß bei einer Verschiebung die die Ebene des Drahtringes durchsetzenden Kraftlinien in ihrer Zahl sich nicht ändern.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, daß eine Induktionswirkung auch dann nicht entsteht, wenn der Drahtring auf und nieder, oder senkrecht zur Papierebene vor- und rückwärts sich bewegt, oder aber die Bewegung eine beliebige ist, doch die Ebene des Ringes ihrer Anfangslage immer parallel bleibt, also immer nur eine Verschiebung und keine Verdrehung stattfindet.

Untersuchen wir nun, nach welchem Gesetze die Änderung der induzierten elektromotorischen Kraft vor sich geht, wenn der Drahtring im homo-

Digitized by Google

genen magnetischen Felde mit gleichmäßiger Geschwindigkeit sich dreht.

Sei in Fig. 8 $a - a$ ein Drahtring, welcher um die Achse A drehbar ist. Der Ring befindet sich im homogenen magnetischen Felde, dessen Intensität durch jene Kraftlinienzahl gegeben ist, welche die Flächeneinheit durchsetzen. Diese Intensität ist B. Wenn r der Halbmesser des Ringes ist, dann wird die durch den kreisförmigen Ring umschlossene Fläche F:

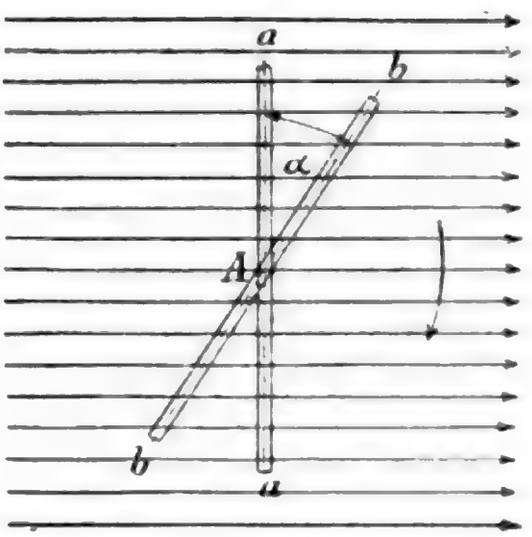


Fig. 8.

$$F = r^2 \Pi$$

sein und die Gesamtzahl der diese Fläche durchsetzenden Kraftlinien ist, wenn die Ebene des Ringes senkrecht auf die Richtung der Kraftlinien steht,

$$N = B F = B r^2 \Pi$$

Der Ring bewegt sich im Sinne der Uhrzeigerbewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω. Nach dem Zeitraume t befindet sich derselbe in der Lage $b - b$, welche mit der ursprünglichen Lage den Winkel α einschließt. In dieser Stellung dringen weniger Kraftlinien durch die Ringebene, ihre Zahl kann gefunden werden, wenn man die senkrechte Projektion von F auf $a - a$ bildet und die so erhaltene Fläche F_1 mit der konstanten Feldstärke B multipliziert.

Nachdem die durch Projektion erhaltene Fläche

$$F_1 = F \cos \alpha$$

ist, wird

Digitized by Google

$$B F_1 = B F \cos \alpha = N_1 = N \cos \alpha$$

sein.

Hieraus ersieht man, daß die Änderung der Kraftlinienzahl nach dem Kosinus des Drehungswinkels erfolgt, also ist bei $\alpha = 90^0$ der Wert von N_1 gleich Null.

Wir sahen, daß die induzierte elektromotorische Kraft folgendermaßen ausgedrückt werden kann:

$$e = \frac{d N_1}{d t}$$

wo $d N_1$ jene Kraftlinienzahländerung bedeutet, welche während des Zeitraumes $d t$ erfolgt. Aus obiger Gleichung folgt, daß

$$d N_1 = - N \sin \alpha \, d \alpha$$

und

$$e = - N \sin \alpha \frac{d \alpha}{d t}$$

In diesem Ausdrucke ist $\frac{d \alpha}{d t}$ die Winkelgeschwindigkeit ω, so daß

$$e = - N \sin \alpha \, \omega.$$

Aus dieser Formel ersieht man, daß die induzierte elektromotorische Kraft im Drahtringe bei homogenem magnetischen Felde und gleichmäßiger Bewegung nach dem Sinusgesetz sich ändert. Die letzte Formel bestätigt auch unser bereits auf Seite 30 gefundenes Ergebnis, nach welchem die induzierte elektromotorische Kraft maximal wird, wenn die Ringfläche parallel zu den Kraftlinien liegt. In diesem Falle ist $\alpha = 90^0$, $\sin \alpha = \sin 90^0 = 1$ und

$$e = - N \omega = E_{max}.$$

Digitized by Google

Wenn die Fläche des Ringes senkrecht auf die Kraftlinien steht, dann ist $\alpha = o$, und $sin\ \alpha = o$, weshalb auch

$$e = o$$

wird.

Die induzierten Ströme besitzen dieselbe induzierende Fähigkeit als der Strom, durch den sie induziert werden. Wenn man also den induzierten Strom in eine Drahtrolle leitet, welche auch eine andere selbständige Wirkung besitzt, dann entsteht in letzterer ein zweiter Induktionsstrom, welcher ebenso wie der erste zu Induktionszwecken verwendet werden kann. Die durch die Induktions-

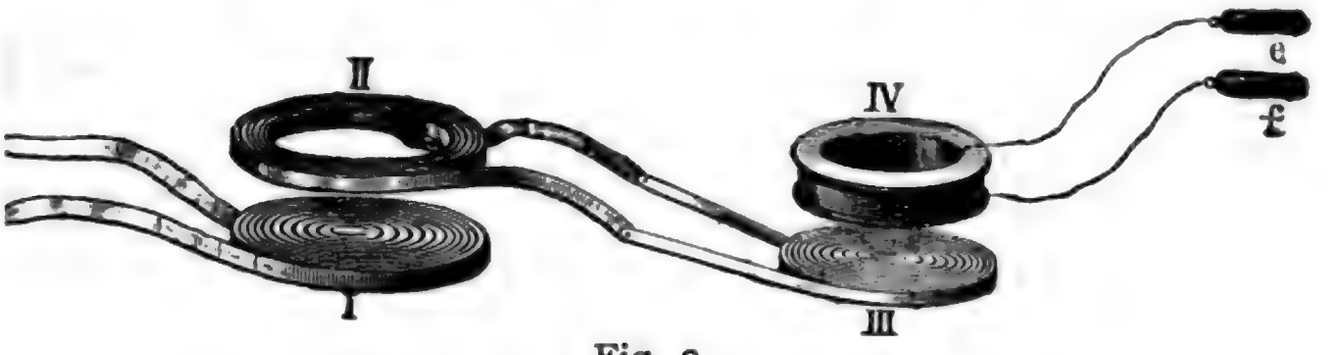


Fig. 9.

ströme induzierten sekundären Ströme nennt man Induktionsströme höherer Ordnung.

Eine Disposition zur Erzeugung von Induktionsströmen höherer Ordnung ist in Fig. 9 dargestellt. In der flachen Leiterrolle I fließt der primäre Strom, dessen Veränderung in der zweiten, ober ihr liegenden Rolle einen sekundären Strom induziert. Dieser Strom fließt nun in die Rolle III und wirkt induzierend auf Rolle IV, deren Drahtenden mit Handhaben versehen sind, um das Vorhandensein des induzierten Stromes höherer Ordnung durch seine physiologische Wirkung beweisen zu können.

Der durch die Handhaben in den menschlichen Körper fließende Strom ist ein Induktionsstrom zweiter Ordnung, da er durch doppelte Induktionswirkung hervorgerufen war. Der erste Induktions-

Digitized by Google

strom ist dem induzierenden Strom entgegengesetzt, dasselbe Verhältnis besteht zwischen dem zweiten und dem ersten induzierten Strom, woraus folgt, daß die Richtung des induzierten Stromes zweiter Ordnung mit jener des ursprünglichen, induzierenden Stromes übereinstimmen muß.

Eine Art der Induktionserscheinung war schon vor Faradays Entdeckung der Induktion bekannt, doch war man mit dem Wesen dieser Erscheinung nicht klar. Man nannte sie Rotationsmagnetismus. Arago bemerkte, daß eine Magnetnadel aus ihrer Ruhelage abgelenkt wird, sobald sich eine Metallmasse in ihrer Nähe bewegt. Die Größe der Ablenkung schien mit dem Materiale der Metallmasse zusammenzuhängen und war diese besonders dann stark, wenn eine Kupferscheibe unter der Magnetnadel rasch rotierte. Bei dieser Anordnung des Experimentes war zwischen der Scheibe und der Magnetnadel eine Glasscheibe befestigt, so daß störende Nebenwirkungen, wie z. B. Luftströmungen, ausgeschlossen waren. Die Ablenkung der Magnetnadel war um so größer, je schneller die Scheibe rotierte, über eine gewisse Grenze fing sogar auch die Magnetnadel an mitzurotieren.

Dieselbe Wirkung, nur im entgegengesetzten Sinne, beobachtete man auf Magnetnadeln, welche über Kupferplatten schwangen. Je näher die Kupferplatte zur Nadel zu liegen kam, um so schneller kam die Nadel in ihre Ruhelage, man konnte also eine dämpfende Wirkung der Kupfermasse konstatieren.

Alle diese Erscheinungen sind Induktionswirkungen und können mit dem Namen Induktion in körperlichen Leitern bezeichnet werden. Im vorigen Falle treten die Kraftlinien aus dem Nordpole der Magnetnadel aus, durchsetzen die Kupferscheibe und treten beim Südpole wieder in die Nadel ein. Bewegt sich die Kupferscheibe, dann

Digitized by Google

stehen wir vor demselben Fall, als wenn ein Leiter im magnetischen Feld sich bewegt, d. h. es entstehen Induktionsströme, welche der die Induktionswirkung hervorrufenden Bewegung entgegenarbeiten. Nachdem aber sie die Scheibe nicht festhalten können, muß die Magnetnadel in der Bewegungsrichtung nachgeben, denn nur in diesem Falle wird die relative Verschiebung zwischen Magnetnadel und Kupferscheibe die möglichst kleinste sein.

Bei der dämpfenden Wirkung der Metallmassen auf eine bewegliche Nadel sind wieder die Induktionsströme jene Faktoren, welche die Dämpfung bewirken. Die schwingende Magnetnadel verursacht in der Metallmasse Ströme, welche wie die induzierten Ströme immer, die Bewegung zu verhindern suchen und die Magnetnadel muß nach kurzer Zeit stehen bleiben.

Die in der Metallmasse induzierten Ströme gleichen sich in derselben aus, sind also um so stärker je kleiner der Widerstand oder je größer die Leitfähigkeit des Metalles ist. Die ist auch die Ursache, warum die dämpfende Wirkung des Kupfers größer als jene des Eisens ist.

Wenn man in die Metallmasse Löcher bohrt oder wenn man dieselbe an mehreren Stellen einschneidet, dann vergrößert man den Widerstand des induzierten Stromkreises und die dämpfende Wirkung ist schwächer. Können sich diese induzierten Ströme voll entwickeln, dann erwärmt sich die Metallmasse stark, ja sie kann unter Umständen auch zum Glühen kommen. Dies ist die Ursache, weshalb man Metallmassen, welche Induktionswirkungen ausgesetzt sind, einschneidet oder aus mehreren, voneinander isolierten Teilen zusammensetzt.

Zum Schlusse sei noch die unipolare Induktion erwähnt. Dies ist eine Erscheinung, welche ent-

steht, wenn in der Nähe von Metallmassen ein Magnet eine Bewegung macht. Bei den bisherigen Induktionserscheinungen entstand der induzierte Strom dadurch, daß die Intensität der Magnetisierung wechselte, bei der unipolaren Induktion aber entstehen die induzierten Ströme dadurch, daß sich der Magnet nur bewegt, ohne sich von der Metallmasse zu entfernen.

Einen, diese Induktionserscheinung demonstrierenden Apparat stellt Fig. 10 vor. *a* ist eine Kupferscheibe, welche zwei Magnetstäbe trägt. Die Kupferscheibe ist an der Welle *b c* befestigt, welche in rasche Rotation versetzt werden kann. Dreht

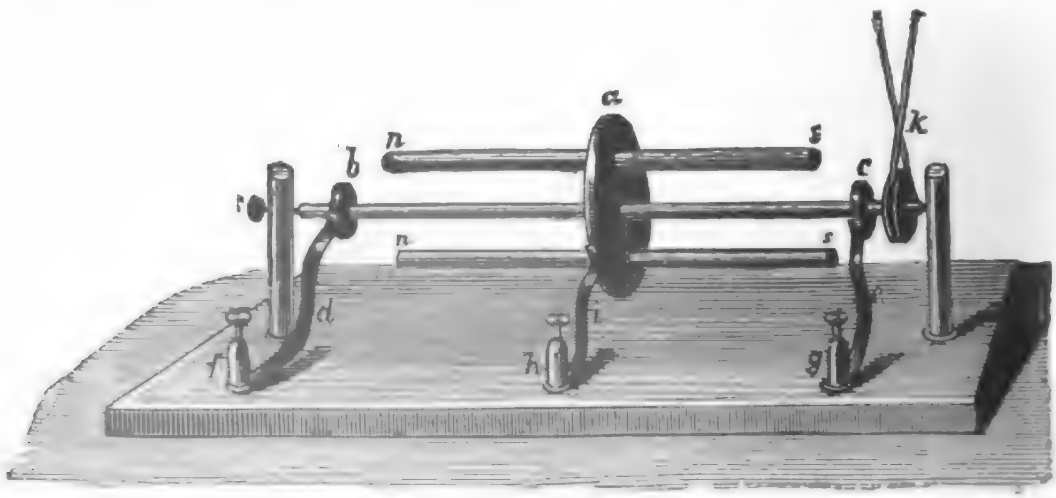


Fig. 10.

sich die Scheibe, dann entstehen induzierte Ströme, welche durch Bürsten abgeleitet werden können. Die Bürsten schleifen bei *a b* und *c*, der induzierte Strom fließt je nach der Drehrichtung von *a* nach *b* und *c* oder umgekehrt. Zwischen *b* und *c* fließt kein Strom, da diese denselben Potentialwert besitzen. Je größer die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe ist, um so größer wird auch die induzierte elektromotorische Kraft und bei gleichbleibendem Gesamtwiderstande auch die Stromstärke sein.

Digitized by Google

II. Kapitel.

Der einphasige Wechselstrom.

Grundbegriffe.

Im vorigen Kapitel behandelten wir einen Fall der Induktionserscheinung, bei welcher ein in sich geschlossener Drahtring in homogenem magnetischen Felde sich bewegte, wobei die Rotationsachse in der Ebene des Drahtringes lag (Fig. 7).

Eine ähnliche Disposition ist in nachstehender Fig. 11 abgebildet. Das magnetische Feld ist durch ein Polpaar NS hervorgerufen, in dessen Bohrung eine Drahtschleife mit konstanter Geschwindigkeit sich bewegt. Die Richtung der Kraftlinien ist durch den horizontal liegenden Pfeil gekennzeichnet, während die Drehrichtung der Schleife durch einen, an der Peripherie des punktierten Kreises liegenden Pfeil angegeben ist. Bei der Rotation entstehen in der Drahtschleife Induktionsströme, deren Richtung in bekannter Weise bestimmt werden kann.

In der in der Figur eingezeichneten Stellung wird in der Drahtschleife ein Strom induziert, dessen Richtung mit der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt ist, wenn man die Schleife in der Richtung des Verlaufes der Kraftlinien betrachtet, denn bei dieser Bewegung vermehren sich die die Ebene der Drahtschleife durchsetzenden Kraftlinien. Diese Stromrichtung kann auch folgendermaßen bestimmt werden.

Wird ein Leiter im magnetischen Felde bewegt, dann muß eine gewisse Arbeit geleistet werden, mit welcher die induzierte elektrische Energie

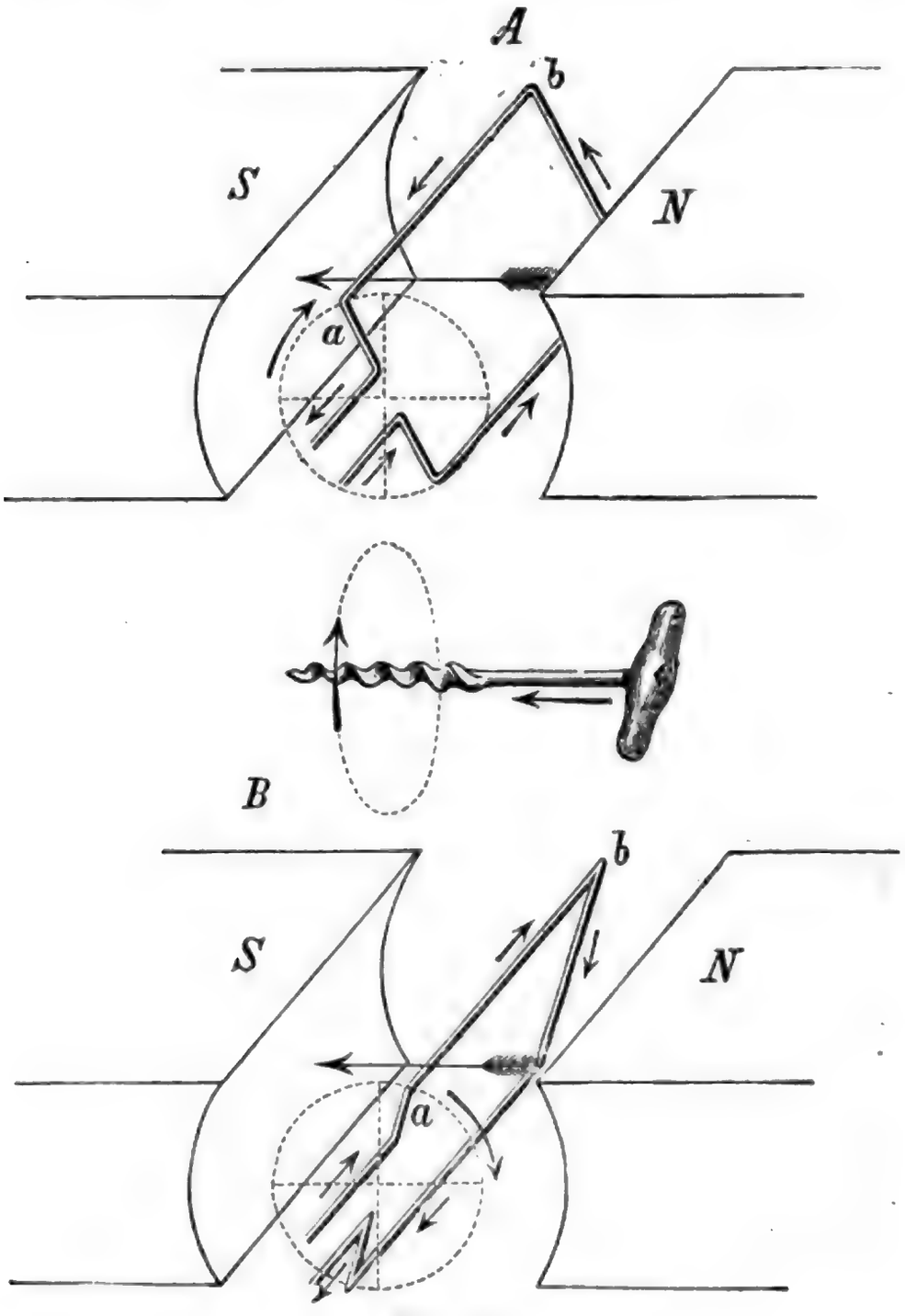


Fig. 11.

von den mit der Bewegung verbundenen Verlusten abgesehen, gleich ist. In unserem Falle bewegt sich die vordere Fläche der Drahtschleife dem Nord-

Digitized by Google

pole zu, folglich muß die induzierte Stromrichtung der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt sein, denn nur durch diesen Strom entsteht dem Nordpol gegenüber ein Nordpol, dessen Näherbringen zum bereits vorhandenen permanenten Pole einen Arbeitsaufwand erheischt. Würde die Stromrichtung mit der Uhrzeigerbewegung übereinstimmen, dann würde an der dem Nordpole zugewendeten Fläche der Drahtschleife ein Südpol entstehen, welcher vom Nordpole angezogen, keine Arbeit erheischen, sondern im Gegenteil Arbeit leisten würde.

Man kann zur Richtungsbestimmung des induzierten Stromes auch die Korkzieherregel verwenden. Wir sahen im vorhergehenden Abschnitte, daß, wenn in einem Leiter ein Strom in der Richtung der Vorwärtsbewegung des Korkziehers fließt, um den Leiter Kraftlinien entstehen, deren Verlauf mit der Drehrichtung des Korkziehers übereinstimmt. Diese Verhältnisse auf die Induktionserscheinung übertragen, sehen wir, daß die Stromrichtung in der Drahtschleife der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt sein muß, denn nur bei dieser Richtung entstehen solche Kraftlinien, welche den bereits vorhandenen entgegengesetzt sind, welche also einer Vergrößerung der die Schleifenebene durchsetzenden Kraftlinienzahl entgegenwirken.

Die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft ist maximal, wenn die Änderung der Zahl der Kraftlinien in der Zeiteinheit eine maximale ist. Dies fällt mit jener Lage zusammen, wenn die Ebene der Drahtschleife parallel mit der Richtung der Kraftlinien ist. Kommt die Schleife in die auf diese Richtung senkrechte Stelle, dann ist die induzierte elektromotorische Kraft Null, da jetzt sämtliche Kraftlinien durch die Ebene der Drahtschleife gehen, doch ist die Änderung ihrer Zahl Null.

Sobald die Drahtschleife diese Lage verläßt, ändert sich die Richtung der elektromotorischen

Digitized by Google

Kraft, sie wird jetzt mit der Uhrzeigerbewegung gleichgerichtet wirken und es entsteht bei geschlossenem Leiterkreise ein Strom derselben Richtung. Der Wert dieser elektromotorischen Kraft wächst immer mehr an, erreicht in der Parallellage zu den Kraftlinien ihr Maximum, nimmt dann wieder stetig ab, um Null zu werden, sobald die Ebene wieder senkrecht auf die Kraftlinien zu stehen kommt.

Auf Seite 32 bewiesen wir, daß die Größe der elektromotorischen Kraft bei gleichmäßiger Bewegung und homogenem magnetischen Felde nach dem Sinusgesetz sich ändert, d. h. wenn e der momentane Wert der elektromotorischen Kraft ist und die Gesamtzahl der Kraftlinien N beträgt, dann wird

$$e = N \sin \alpha \, \omega$$

wo ω die Winkelgeschwindigkeit der Drahtschleife bedeutet und α jenen Winkel, welchen die Drahtschleife mit jener Lage im fraglichen Zeitpunkte bildet, welcher die minimale Induktion entspricht, in welcher also die Ebene der Drahtschleife senkrecht auf die Richtung der induzierenden Kraftlinien steht.

Die in der Drahtschleife induzierte elektromotorische Kraft ist von wechselnder Richtung, und wird der Leiterkreis geschlossen, dann entsteht eine elektrische Strömung, welche ebenso veränderlich ist, als die elektromotorische Kraft selbst. Dieser Strom heißt Wechselstrom.

In obiger Disposition kann der induzierte Wechselstrom nur dann in den äußeren Stromkreis fließen, wenn man die Enden der Drahtschleife mit zwei voneinander isolierten Metallringen, den sogenannten Schleifringen verbindet und auf diesen Metallkontakte, die Bürsten schleifen läßt. Der äußere Stromkreis wird mit diesen Bürsten verbunden.

Digitized by Google

Zwischen den Schleifringen herrscht demnach die zur Verfügung stehende Wechselstromspannung, deren Größe von der Rotationsgeschwindigkeit der Drahtschleife, von der Intensität des magnetischen Feldes und von der Zahl der der induktiven Wirkung ausgesetzten Leiterelemente abhängt. Je länger also die Schleife, um so größer wird bei sonst gleichen Verhältnissen die induzierte elektromotorische Kraft.

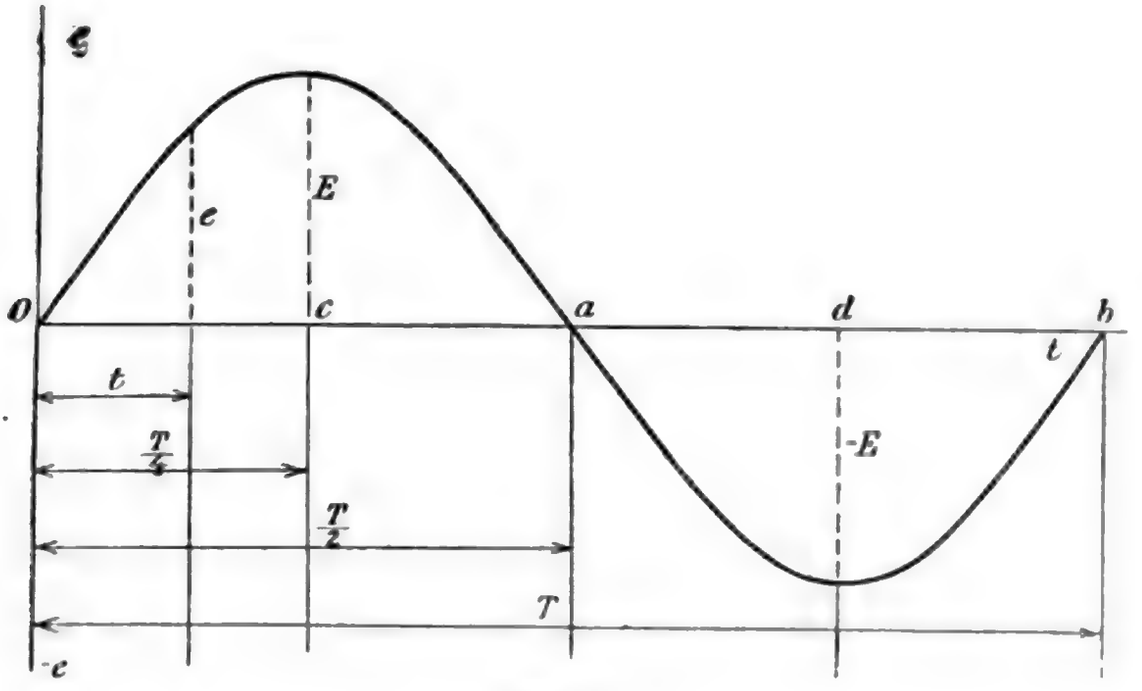


Fig. 12.

Wir sahen, daß sich diese elektromotorische Kraft nach dem Sinusgesetz ändert. Ist der Gesamtwiderstand des Leiterkreises konstant, dann muß nach Ohms Gesetz die Stromstärke ebenso veränderlich sein, als die elektromotorische Kraft, d. h. die Stromstärke verändert sich auch nach dem Sinusgesetz. Sowohl die Änderung der Stromstärke, als auch jene der elektromotorischen Kraft kann demnach in ihrem zeitlichen Verlaufe durch eine Sinuskurve dargestellt werden (Fig. 12).

Befassen wir uns zunächst mit der Spannungskurve. In einem rechtwinkeligen Koordinatsystem

Digitized by Google

tragen wir auf die Abscissenachse die Zeit, auf die Ordinatenachse die Werte der induzierten elektromotorischen Kraft. Für die Zeitrechnung sei der Ausgangspunkt jene Lage der Drahtschleife maßgebend, in welcher alle Kraftlinien sie senkrecht durchsetzen, in welcher also die induzierte elektromotorische Kraft Null ist. Dreht sich die Schleife mit konstanter Geschwindigkeit, dann wird die Änderung der elektromotorischen Kraft bei homogenem Felde nach dem Sinusgesetz verlaufen und sie wird während einer vollen Umdrehung zweimal den Nullwert erreichen, da in einer Umdrehung die Ebene der Drahtschleife zweimal senkrecht auf die Richtung der Kraftlinien zu stehen kommt. Ist die Zeitdauer einer Umdrehung T, dann liegt der Endpunkt der Sinuskurve bei b, welcher Punkt von o in der Entfernung T liegt. Die Rotation ist eine gleichförmige, folglich muß der zweite Nullpunkt bei a in der Entfernung $\frac{T}{2}$ liegen. Zwischen $o\,a$ und $a\,b$ ist die induzierte elektromotorische Kraft je einmal maximal, jedoch in entgegengesetztem Sinne, da die Richtung während einer vollen Umdrehung zweimal wechselt. Die maximale elektromotorische Kraft ist $+ E$ beziehungsweise $- E$ und fallen diese von der Anfangslage aus gerechnet in c und d, welchen $\frac{T}{4}$ respektive $\frac{3}{4}\,T$ Umdrehungszeit entspricht.

Die Ordinaten der Sinuskurve geben die momentanen Werte der induzierten elektromotorischen Kraft in jedem Augenblicke der Rotation. Will man z. B. wissen, welchen Wert die elektromotorische Kraft nach dem Zeitraume t, vom Anfange der Rotation gerechnet, besitzt, dann bildet man nur die zur Abscisse gehörige Ordinate. Dies ist e, und ihre Länge im Spannungsmaßstab abgemessen, gibt ihren Wert in der betreffenden Spannungseinheit.

Digitized by Google

Die Zeit T, welche nötig ist, daß die Sinuskurve eine vollständige wird, heißt der Zeitraum einer Periode. In unserem Falle, bei zweipoligem Felde, entspricht jeder vollständigen Umdrehung eine Sinuskurve, d. h. eine Periode und wenn die Drahtschleife zu einer Umdrehung die Zeiteinheit, die Sekunde braucht, dann sagt man ihre Periodenzahl ist Eins. Unter Periodenzahl versteht man die Anzahl der auf eine Sekunde fallenden Perioden, wenn man also sagt, ein Wechselstrom hat 42 Perioden, so bedeutet dies, daß bei diesem Wechselstrome die induzierte elektromotorische Kraft in einer Sekunde 42 volle Perioden macht.

Nachdem bei jeder Periode die elektromotorische Kraft einmal positiv und einmal negativ wird, d. h. ihre Richtung während einer Periode zweimal wechselt, kann man neben der Periodenzahl auch von einer Wechselzahl sprechen. Es ist aus dem vorhergehenden einleuchtend, daß die Wechselzahl gleich mit der doppelten Periodenzahl ist. Wenn also der Wechselstrom 42 Perioden hat, dann wird seine Wechselzahl $2 \times 42 = 84$ sein.

Im allgemeinen hat eine Wechselstrommaschine k Pole und macht n Touren in der Minute. Wenn nun bei zweipoliger Maschine die Periodenzahl gleich war mit der sekundlichen Tourenzahl der Drahtschleife, dann wird bei k Polen die Periodenzahl

$$\sim = \frac{n\,k}{60 \,.\, 2}$$

sein, da $\frac{n}{60}$ die sekundliche Tourenzahl und $\frac{k}{2}$ die Zahl der Polpaare bedeutet.

Die Wechselzahl wird demnach durch die Formel

$$z = 2 \sim = \frac{n\,k}{60}$$

ausgedrückt sein.

Digitized by Google

Z. B. Eine Wechselstrommaschine hat 8 Pole und macht das Magnetrad 750 Touren in der Minute. Wie groß ist die Periodenzahl? Welchen Wert hat die Wechselzahl?

Die Periodenzahl wird aus obiger Gleichung ausgerechnet:

$$\sim = \frac{n\,k}{60\,.\,2} = \frac{750\,.\,8}{120} = 50.$$

Die Wechselzahl dagegen:

$$z = 2 \sim = 2 \times 50 = 100.$$

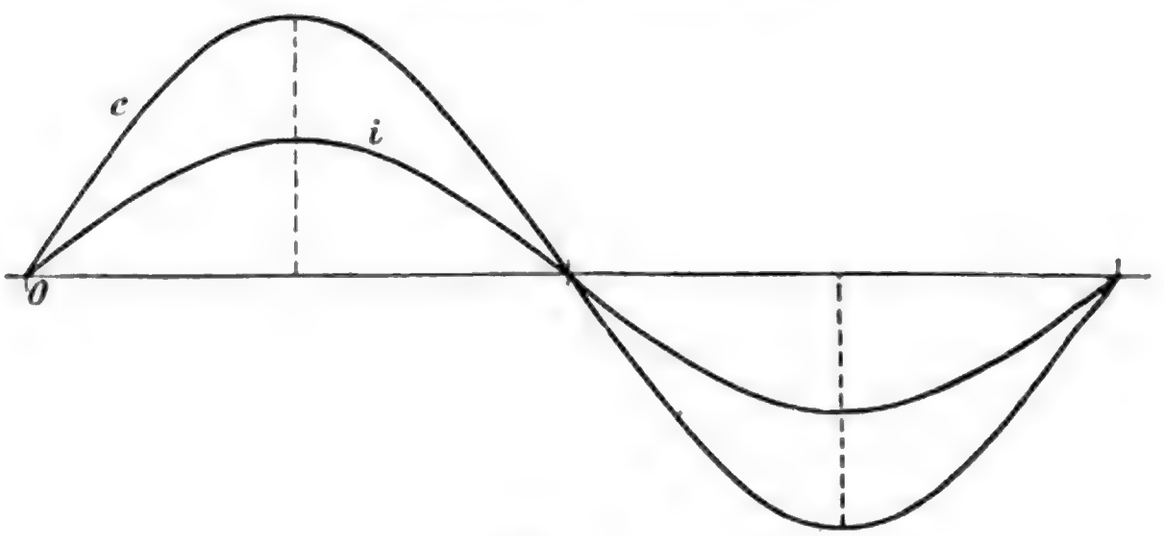


Fig. 13.

Welche Tourenzahl muß diese Maschine haben, daß die Periodenzahl des induzierten Wechselstromes 60 sei?

Aus der Gleichung der Periodenzahl wird:

$$n = \frac{60\,.\,2\,.\sim}{k} = \frac{120\,.\,60}{8} = 900.$$

Dies ist die gesuchte Tourenzahl der Maschine in einer Minute.

In ähnlicher Weise kann auch bei gegebener Wechselzahl und Touren die Polzahl ermittelt werden, nur muß man hierbei darauf achten, daß k nur eine ganze, gerade Zahl sein kann und dem-

Digitized by Google

gemäß eventuell die Tourenzahl oder Periodenzahl abgeändert werden muß.

Unter Phase eines Wechselstromes versteht man jenen Zeitraum, welcher vom Anfange einer Periode gerechnet, verstrichen ist. In Phase *t* z. B. bei Fig. 12 hat die induzierte elektromotorische Kraft bereits den Momentwert *e*.

Man kann auch von Phasengleichheit und Phasenungleichheit sprechen. Ist bei einem Wechselstrome Phasengleichheit zwischen der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke vorhanden, so bedeutet dies, daß sowohl die Spannungs- als auch die

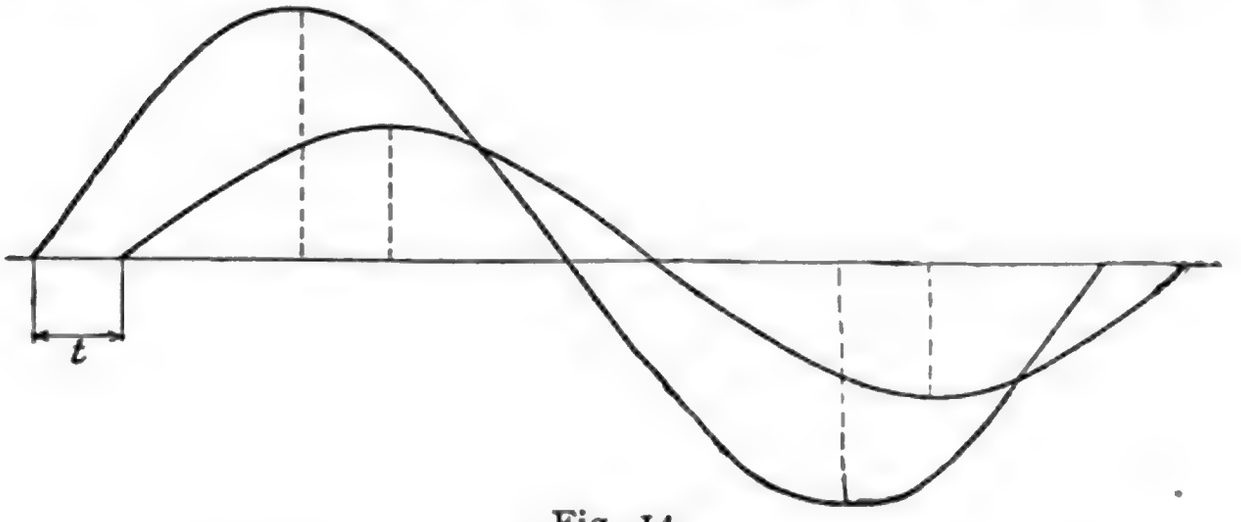


Fig. 14.

Stromstärkekurve ihre Nullpunkte respektive Maximalwerte gleichzeitig erreichen (Fig. 13). *e* ist die Spannungs-, *i* die Stromstärkekurve. Die Periodenzahl ist bei beiden dieselbe, wenn also bei einer Periode die Nullpunkte zusammenfallen, so steht dies für alle Perioden, d. h. die elektromotorische Kraft und die Stromstärke sind in Phase miteinander.

Bei Phasenungleichheit kann von einer voreilenden und von einer nacheilenden Phasenverschiebung die Rede sein. Wie wir später im betreffenden Abschnitte sehen werden, verursacht eine mit vielen Windungen und einem Eisenkerne versehene Spule eine Phasenverschiebung und zwar bleibt in diesem Falle die Stromstärke hinter der

Digitized by Google

elektromotorischen Kraft zurück (Fig. 14). Dies bedeutet soviel, daß die Stromstärke später, also nur erst nach dem Zeitraume t seinen Null-, respektive Maximalwert erreicht, in welchem Zeitpunkte die Spannung bereits einen, nach diesen Werten fallenden Momentwert hat. Man sagt in diesem Falle, der Strom ist zur Spannung phasenverspätet.

Es kann aber auch von einer Phasenverschiebung im entgegengesetzten Sinne die Rede sein, d. h. der Strom kann zur Spannung phasenverfrüht werden. Jetzt ist das Verhältnis umgekehrt, die Spannung bleibt hinter der Stromstärke zurück und die Stromstärke erreicht ihr positives Maximum früher als die elektromotorische Kraft.

Bei den Sinuskurven ist allgemein üblich, daß man auf die Abscissenachse nicht die Zeit, sondern den Drehungswinkel der Drahtschleife aufträgt und zwar so, daß einer vollen Periode eine ganze Drehung, also 360^0 entspricht. Die Spannungs-, beziehungsweise Stromkurve bleibt dieselbe, der Unterschied ist nur, daß man nicht sagt, die elektromotorische Kraft hat vom Anfange der Drehung gerechnet den Momentwert e erreicht, sondern daß der Momentwert der elektromotorischen Kraft nach einem Drehungswinkel von φ^0 e ist.

In diesem Sinne aufgefaßt, muß also T auf 360^0 eingeteilt werden. Wir müssen uns dies fest einprägen und die Gradenteilung nicht auf den Umfang der Armatur beziehen, sonst würde man bei mehrpoligen Maschinen zu falschen Ergebnissen gelangen. Dies ist nur für den speziellen Fall der zweipoligen Maschine giltig, da bei dieser der Zeitraum einer Periode mit der für eine volle Umdrehung nötigen Zeit gleich ist.

Diese Verhältnisse auf Phasenverspätung, beziehungsweise -Voreilung bezogen, sagt man, ein Strom ist der elektromotorischen Kraft in der Phase um φ Grade verspätet oder verfrüht, je nachdem

Digitized by Google

er seinen Maximalwert später oder früher erreicht. Bei einer Drahtschleife im zweipoligen magnetischen Felde bedeutet dies soviel, daß die Schleife die Lage der maximalen Induktion bereits um φ^0 Winkel verlassen hat, als erst die Stromstärke maximal wird. Bei phasenverfrühtem Strome sind

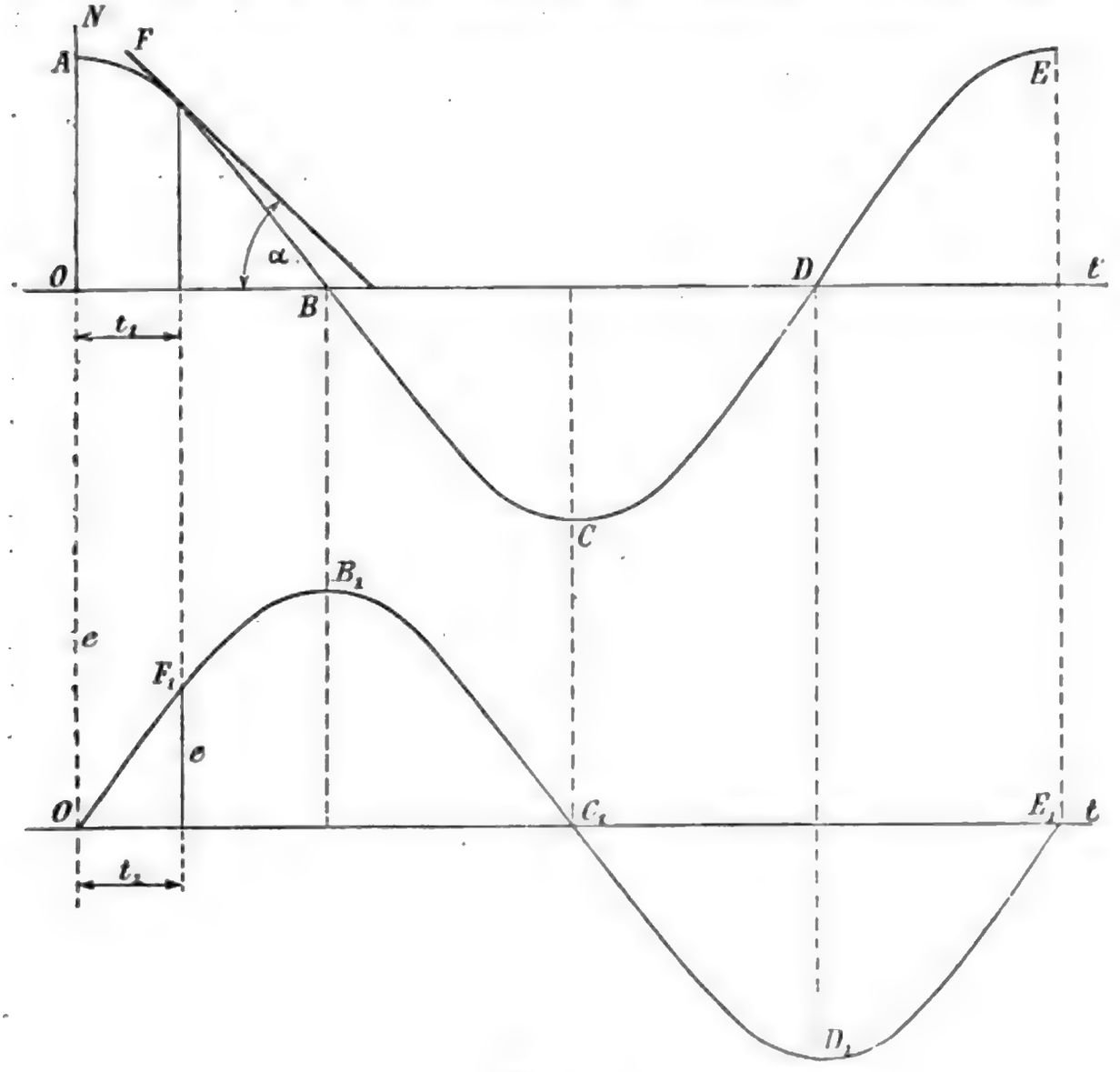


Fig. 15.

die Verhältnisse verkehrt, da ist nämlich die Drahtschleife noch φ^0 Winkel vor der Lage der maximalen Induktion, als bereits die Stromstärke ihren maximalen Wert erreicht hat.

Bei mehrpoligen Maschinen teilt man die Entfernung zwischen zwei aufeinanderfolgenden, gleich-

Digitized by Google

namigen Polen in 360°, da während dieses Umfangsteiles der Armatur die elektromotorische Kraft eine volle Periode hat. Die Phasenverschiebungen beziehen sich demnach auch auf diesen Teil des Armaturumfanges.

Untersuchen wir im Nachstehenden den Zusammenhang zwischen der Änderung der gesamten Kraftlinienzahl und der induzierten elektromotorischen Kraft und zeichnen wir die dazu gehörigen Sinuskurven.

Sei in Fig. 15 die Kurve $ABCDE$ eine die Änderung der Gesamtzahl der Kraftlinien darstellende Sinuslinie. Bei der Drehung der Drahtschleife verändert sich die die Ebene der Schleife durchsetzende Kraftlinienzahl nach dem Sinus des Verdrehungswinkels der Schleife, wenn man als Anfangspunkt jene Lage betrachtet, in welcher die Schleife mit der Richtung der Kraftlinien parallel liegt, in welcher also die induzierte elektromotorische Kraft maximal ist.

Verändert sich die Zahl der Kraftlinien während der Zeit dt um dN, dann ist die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft, wie wir sahen (Seite 20):

$$e = \frac{dN}{dt}.$$

Wenn also in Fig. 15 im rechtwinkeligen ebenen Koordinatensystem die Abscissenachse die Leitachse, die Ordinatenachse dagegen die Achse der Gesamtzahl der Kraftlinien ist, dann wird e durch die Tangente jenes Winkels α gegeben, welcher zum fraglichen Punkte gehört, da

$$e = \frac{dN}{dt} = tg\,\alpha.$$

Diesen Wert für alle Punkte der Kurve $ABCDE$ ermittelt und sie mit den dazu gehörenden

Digitized by Google

Zeitpunkten t in ein anderes Koordinatensystem übergetragen, in welchem die Abscissenachse die Zeit, die Ordinatenachse dagegen die Änderung der induzierten elektromotorischen Kraft darstellt, dann bekommen wir die Kurve $O F_1 B_1 C_1 D_1 E_1$, als die Sinuskurve der elektromotorischen Kraft.

Aus beiden Kurven ist ersichtlich, daß diese um eine Viertelperiode gegeneinander verschoben sind, und zwar ist die elektromotorische Kraft der Veränderung der magnetischen Kraftlinien um eine Viertelperiode phasenverspätet, da sie ihr positives Maximum nach dem positiven Maximum der Kraftlinien um eine Viertelperiode später erreicht.

Bisher sprachen wir nur von Moment- und Maximalwerten der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke. Nach den Gleichungen Seite 32 kann der Momentwert der induzierten elektromotorischen Kraft folgendermaßen ausgedrückt werden

$$e = E_{max} \sin \alpha$$

wobei α den Phasenwinkel bedeutet.

Die Meßinstrumente können aber naturgemäß weder die Moment- noch die Maximalwerte anzeigen, sondern geben einen Ausschlag, welcher einem gewissen Mittelwerte entspricht. Ist das Instrument so beschaffen, daß ihr Ausschlag mit der ersten Potenz der Spannung proportional ist, dann zeigt sie einen Spannungswert an, welcher als mittlere Spannung bezeichnet wird. Ist dagegen der Ausschlag mit den Quadraten der momentanen Spannungswerte proportional, dann zeigt das Instrument auch einen Mittelwert an, dieser ist aber vom ersteren verschieden, und wird als effektive Spannung bezeichnet.

Untersuchen wir nun die Beziehung zwischen der mittleren und der maximalen elektromotorischen Kraft.

In Fig. 16 bedeutet die Sinuskurve die Veränderung der elektromotorischen Kraft während einer halben Periode, wobei die Abscissen die Phasenwinkel darstellen. In der Phase α ist der Momentwert der elektromotorischen Kraft e, diese wird während der differentialen Änderung der Phase von $d\alpha$ als konstant betrachtet.

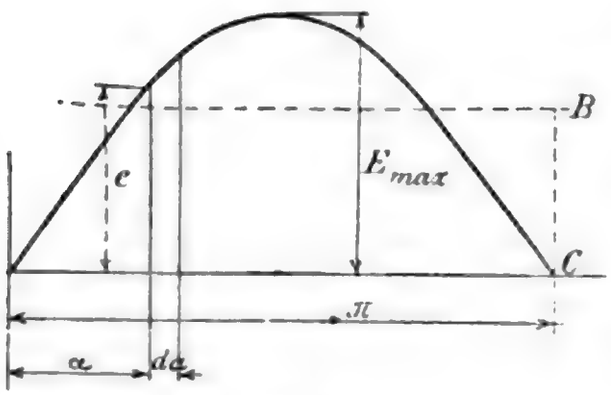


Fig. 16.

Der Mittelwert ist die Höhe jenes Parallelogrammes, dessen Länge gleich der halben Periode ist, also e_m.

Diese Fläche kann also ausgedrückt werden, als:

$$\overline{OC} \,.\, \overline{BC} = \pi\, e_m.$$

Nach obigem muß dies gleich mit dem Flächeninhalt der halben Sinuskurve sein, daher

$$F = \int_o^{\pi} e\, d\,\alpha = \pi\, e_m.$$

Hieraus

$$e_m = \frac{1}{\pi} \int_o^{\pi} e\, d\,\alpha = \frac{1}{\pi} \int_o^{\pi} E_{max}\, sin\, \alpha\, d\,\alpha$$

oder

$$e_m = \frac{1}{\pi}\, E_{max} \int_o^{\pi} sin\, \alpha\, d\,\alpha.$$

Nachdem aber

$$\int_o^{\pi} sin\, \alpha\, d\,\alpha = 2$$

Digitized by Google

wird

$$e_m = \frac{2}{\pi} E_{max}.$$

Dies ist der gesuchte Ausdruck für den Zusammenhang zwischen der mittleren und der maximalen elektromotorischen Kraft e_m beziehungsweise E_{max}.

Der Phasenwinkel α kann aber auch mit Hilfe der Winkelgeschwindigkeit ω ausgedrückt werden und zwar ist

$$\alpha = \omega t$$

wenn t jene Zeit bedeutet, während welcher der Winkel von Ø auf α gewachsen ist. In diesem Falle kann die mittlere elektromotorische Kraft ebenso bestimmt werden als früher, nur wird jetzt unsere Gleichung

$$e_m = \frac{2}{T} \int_o^{\frac{T}{2}} E_{max} \sin \omega t \, dt = \frac{2}{T} \int_o^{\frac{T}{2}} E_{max} \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) dt$$

da jetzt die Zeit einer halben Periode auf die Abscissenachse aufgetragen werden muß.

Die Integration ausgeführt bekommen wir dasselbe Ergebnis als früher, nämlich:

$$e_m = \frac{2}{\pi} E_{max}.$$

Bestimmung des Verhältnisses zwischen der effektiven und der maximalen elektromotorischen Kraft.

Unter effektiver elektromotorischer Kraft versteht man die Quadratwurzel aus dem Mittelwerte der Quadrate der momentanen elektromotorischen Kräfte.

Digitized by Google

Um die Beziehung zwischen dieser effektiven und der maximalen elektromotorischen Kraft bestimmen zu können, betrachten wir zunächst die Fig. 17, bei welcher die punktierte Kurve die Sinuskurve der elektromotorischen Kraft, die volle dagegen die den Quadraten der Momentwerten entsprechende Kurve bedeutet.

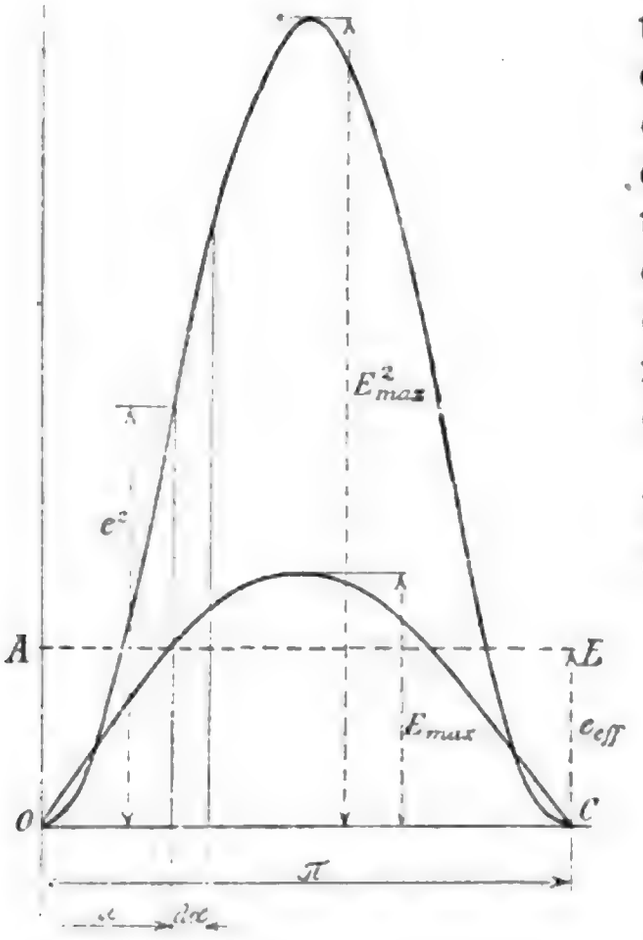


Fig. 17.

Der momentane Wert der Spannung in der Phase α sei e. Während der unendlich kleinen Phasendifferenz $d\alpha$ soll dieser Spannungswert als konstant betrachtet werden. Das Quadrat wird e^2, und der Flächeninhalt $e^2 d\alpha$ sein. Der Mittelwert dieser Quadrate ist demnach

$$F_1 = \int_0^{\pi} e^2 d\alpha.$$

Nun bilden wir ein Parallelogramm, dessen Länge π und Höhe das Quadrat der gesuchten effektiven EMK e_{eff} sei und zwar für $OABC$

$$F_1 = \pi e^2_{eff}.$$

Aus beiden letzten Gleichungen folgt, daß:

$$\pi e^2_{eff} = \int_0^{\pi} e^2 d\alpha$$

Digitized by Google

oder

$$e^2_{eff} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e^2 \, d\alpha.$$

Nachdem aber

$$e = E_{max} \sin \alpha$$

wird

$$e^2_{eff} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E^2_{max} \sin^2 \alpha \, d\alpha.$$

Von Ø bis π integriert, bekommen wir folgenden Ausdruck:

$$e^2_{eff} = \frac{1}{2} E^2_{max}$$

oder

$$e_{eff} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}.$$

Dasselbe Resultat erzielt man, wenn die Abscissenachse — nicht die Winkel — sondern die Zeitachse ist. In diesem Falle ist anstatt $d\alpha$ und π, dt beziehungsweise $\frac{T}{2}$ zu setzen, und wird:

$$e^2_{eff} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E^2_{max} \sin^2 \left(\frac{2\pi}{T} t \right) dt.$$

Durch Integration erhält man das obige Ergebnis.

Die effektive elektromotorische Kraft wird aus der maximalen berechnet, wenn man letztere mit $\sqrt{2}$ dividiert.

Instrumente, welche effektive Werte messen, beruhen auf der elektrostatischen, elektrodynamischen und der Wärmewirkung der Ströme. Mittel-

werte zeigen solche Apparate an, bei denen die Ablenkung des beweglichen Teiles durch die magnetisierende Wirkung der Ströme erfolgt.

Die Stromstärke ändert sich auch nach dem Sinusgesetz, folglich sind die bisher abgeleiteten Beziehungen auch hier giltig, weshalb die mittlere Stromstärke durch

$$i_m = \frac{2}{\pi} J_{max}$$

die effektive dagegen durch

$$i_{eff} = \frac{J_{max}}{\sqrt{2}}$$

ausgedrückt werden kann. Hierbei ist J_{max} der Maximalwert der Wechselstromstärke.

Bei allen unseren Untersuchungen nahmen wir an, daß sowohl die elektromotorische Kraft, als auch die Stromstärke in ihren Änderungen dem Sinusgesetz folgen, und dürfen wir nicht vergessen, daß die erhaltenen Ergebnisse nur für diesen Fall richtig sind. Folgt die Veränderung anderen Gesetzen, dann müssen die Verhältnisse für diese Fälle besonders berechnet werden.

Für dieselbe Kurve ist das Verhältnis zwischen der effektiven und der mittleren elektromotorischen Kraft oder Stromstärke gleich. Diese Verhältniszahl wird Formfaktor genannt, da ihre Größe vom effektiven Wert, dieser aber selbst von der Kurvenform abhängt. Für den Formfaktor haben wir also folgenden Ausdruck:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} E^2_{max} \sin^2 \alpha \, d\alpha}}{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} E_{max} \sin \alpha \, d\alpha} = \frac{e_{eff}}{e_m}.$$

Digitized by Google

In nachstehender Tabelle ist der Formfaktor für verschiedene Kurvenformen zusammengestellt:

Hieraus ist ersichtlich, daß je spitzer die Kurve, um so größer der Formfaktor. Im ersten Fall und bei Gleichstrom ist $f = 1$.

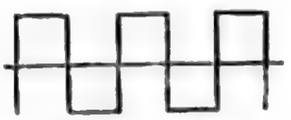
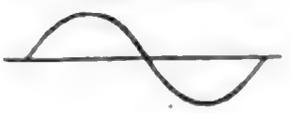
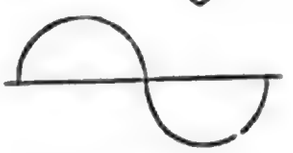
f	Kurvenform
1	
1,11	
1,16	
1,063	
1,35	

Fig. 18.

Unsere bisherigen Ergebnisse zusammengefaßt, unterscheiden wir folgende Größen:

Maximale EMK und Stromstärke	E	bezw.	J.
Momentwerte	e	„	i.
Mittelwerte	e_m	„	i_m.
Effektivwerte	e_{eff}	„	i_{eff}.

Bei nachfolgenden Erörterungen werden wir für die verschiedenen Werte immer obige Bezeichnungen benutzen, ohne sie besonders hervorzuheben, weshalb bei der Verfolgung weiterer Untersuchungen dies vor Augen zu halten ist.

Digitized by Google

III. Kapitel.

Graphische Behandlung der Wechselstromprobleme.

Bei der rein analytischen Behandlung der Wechselstromprobleme kommt man oft zu sehr komplizierten Ergebnissen, welche die Übersichtlichkeit derselben für den in der Mathematik weniger bewanderten sehr erschwert. Deshalb benutzt man in der Wechselstromtechnik mit Vorliebe die graphische Behandlung der Probleme, d. h. jene Methoden, mit welchen die Entwicklung derselben auf Grund jener Beziehungen ausgeführt werden kann, welche zwischen den mathematischen Größen und gewissen geometrischen Elementen besteht. Im folgenden sollen diese Methoden ausführlich beschrieben werden.

Eine Methode ist bereits aus dem vorhergehenden Kapitel bekannt. Die graphische Darstellung dieser Art nennt man Wellendiagramme, sie bestehen darin, daß man in einem rechtwinkligen Koordinatensystem als Abscisse die Zeit, als Ordinate die elektromotorische Kraft oder eine andere zu untersuchende Wechselstromgröße aufträgt und aus den zusammengehörigen Werten die die Veränderung darstellende Kurve bestimmt.

Anstatt der Zeit kann man auch den Phasenwinkel auf die Abscissenachse auftragen, nur muß

Digitized by Google

man vor Augen halten, daß dem Zeitraume einer Periode immer 360° Phasenwinkel entsprechen.

Mit den Wellendiagrammen lassen sich außer dem Verlaufe der Änderung der Wechselstromgrößen besonders die Phasenverhältnisse gut darstellen. In Wechselstromkreisen sind zwischen den verschiedenen elektromotorischen Kräften und Stromstärken die verschiedensten Phasenverhältnisse, will man daher die Phasenverschiebungen ermitteln, dann sucht man einfach zwei benachbarte Durchschnittspunkte gleichen Sinnes der Abscissenachse und der Kurven auf, die Entfernung beider Punkte voneinander gibt das Maß der Phasenverschiebung. In Fig. 14 ist durch ein Wellendiagramm vorgeführt, daß die Stromstärke *i* zur elektromotorischen Kraft *e* phasenverspätet ist, und zwar ist die Zeit der Phasenverspätung *t*. Diese Phasenverspätung kann auch durch einen Winkel ausgedrückt werden, und bildet den Zusammenhang zwischen beiden Größen der einmal bereits erwähnte Umstand, daß der Zeitraum einer Periode 360° Winkel entspricht.

Eine bequemere Methode als die eben beschriebene ist die graphische Darstellung der Wechselstromerscheinungen durch das Vektor- oder Uhrzeigerdiagramm.

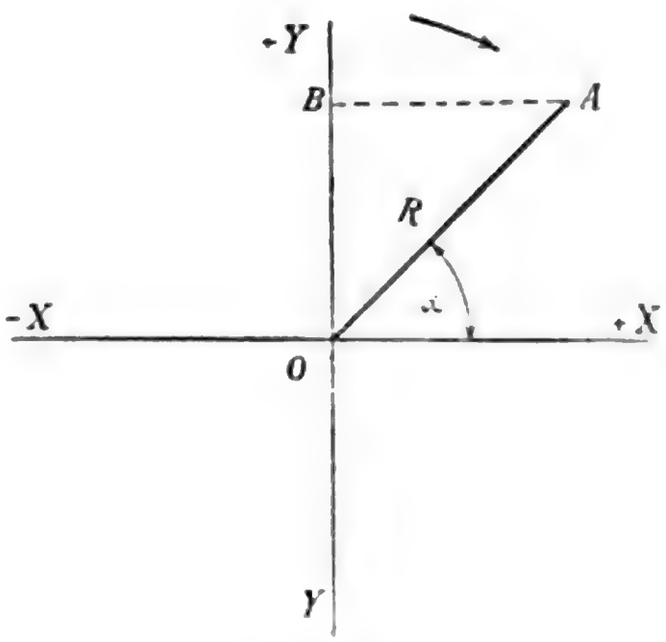


Fig. 19.

Das Wesen dieser Darstellungsweise besteht darin, daß man die Projektionen einer konstanten, um einen Endpunkt mit konstanter Winkelgeschwindigkeit sich drehenden Geraden, dem

sogenannten Radiusvektor, auf eine fixe Gerade bildet. In Fig. 19 sei der um den Punkt O mit konstanter Geschwindigkeit sich drehende Radiusvektor R, und die Gerade, auf welchen die Projektionen gebildet werden, die Y-Achse. O ist der Anfangspunkt eines rechtwinkeligen Koordinatensystems, dessen zwei aufeinander senkrechte Achsen X und Y sind. Der Radiusvektor bildet in der bezeichneten Lage mit der Abscissenachse den Winkel α.

Bedeutet R den Maximalwert E_{max} der elektromotorischen Kraft, dann ist $OA = E_{max}$ und die Projektion von R auf die Y-Achse OB der Momentwert derselben, denn

$$\overline{OB} = \overline{OA} \sin \alpha = R \sin \alpha = E_{max} \sin \alpha = e.$$

In jeder Lage des Radiusvektors ist demnach die Größe der momentanen elektromotorischen Kraft durch die Projektion auf die Ordinatenachse gegeben. Wird $\alpha = 90^0$, dann ist $\sin \alpha = 1$ und

$$e = R \sin 90^0 = R = E_{max}$$

d. h. der Radiusvektor ist immer der Maximalwert der betreffenden Wechselstromgröße.

Das Uhrzeigerdiagramm ist jedoch noch nicht vollkommen beschrieben, denn es muß noch bestimmt werden, ob vom betrachteten Zeitpunkte gerechnet die Momentwerte zu- oder abnehmen. Man muß deshalb eine bestimmte Drehrichtung des Radiusvektors annehmen, wodurch dann im Diagramm bereits alle Verhältnisse genau umschrieben sind. In unserer Figur hat bei der eingezeichneten Drehrichtung die elektromotorische Kraft eine abnehmende Tendenz, sie wird Null, sobald R in die X-Achse fällt, denn dann ist $\alpha = o$ und $\sin \alpha = o$ folglich

$$e = R \sin \alpha = E_{max}\, \emptyset = \emptyset.$$

Digitized by Google

Nach weiterer Drehung des Radiusvektors werden die Projektionen negative Werte annehmen, diese entsprechen den momentanen elektromotorischen Kräften negativen Vorzeichens. Nachdem während einer ganzen Umdrehung des Radiusvektors die Wechselstromgröße alle ihre positiven und negativen Werte einmal durchläuft, folgt, daß eine volle Umdrehung, oder bis α von 0^0 bis 360^0 anwächst, einer Periode entspricht.

Im Uhrzeigerdiagramm ist also der Verlauf der Änderung einer Wechselstromgröße vollständig bestimmt, wenn man die Größe des Radiusvektors und seine Drehrichtung angibt. Die Winkelgeschwindigkeit hängt davon ab, wie viel Perioden die Wechselstromgröße in der Zeiteinheit, der Sekunde hat, denn der Radiusvektor muß in der Sekunde eine Umdrehungszahl besitzen, welche der Periodenzahl gleich ist.

Jene Wechselstromgrößen, welche ihre Null- und Maximalwerte gleichzeitig erreichen, welche also in ihren Phasen vollkommen übereinstimmen (Fig. 13), werden durch zwei Vektoren dargestellt, welche einander decken, also sowohl in die X- als auch in die Y-Achse zu gleicher Zeit eintreffen. Die Längen der zwei Vektoren sind im allgemeinen verschieden, sie können aber auch einander gleich sein, je nachdem die Maximalwerte der Wechselstromgrößen verschieden oder einander gleich sind.

Ist zwischen zwei Wechselstromgrößen eine Phasenverschiebung, dann wird diese durch zwei solche Vektoren gekennzeichnet, deren Richtungen miteinander den Phasenverschiebungswinkel bilden, denn der eine Vektor erreicht sein Maximum erst dann, nachdem der andere bereits dasselbe, desselben Vorzeichens um den Phasenverschiebungswinkel verlassen hat (Fig. 20).

R_1 und R_2 sind die beiden Vektoren, deren Lage und Größe verschieden sind. Im fraglichen

Digitized by Google

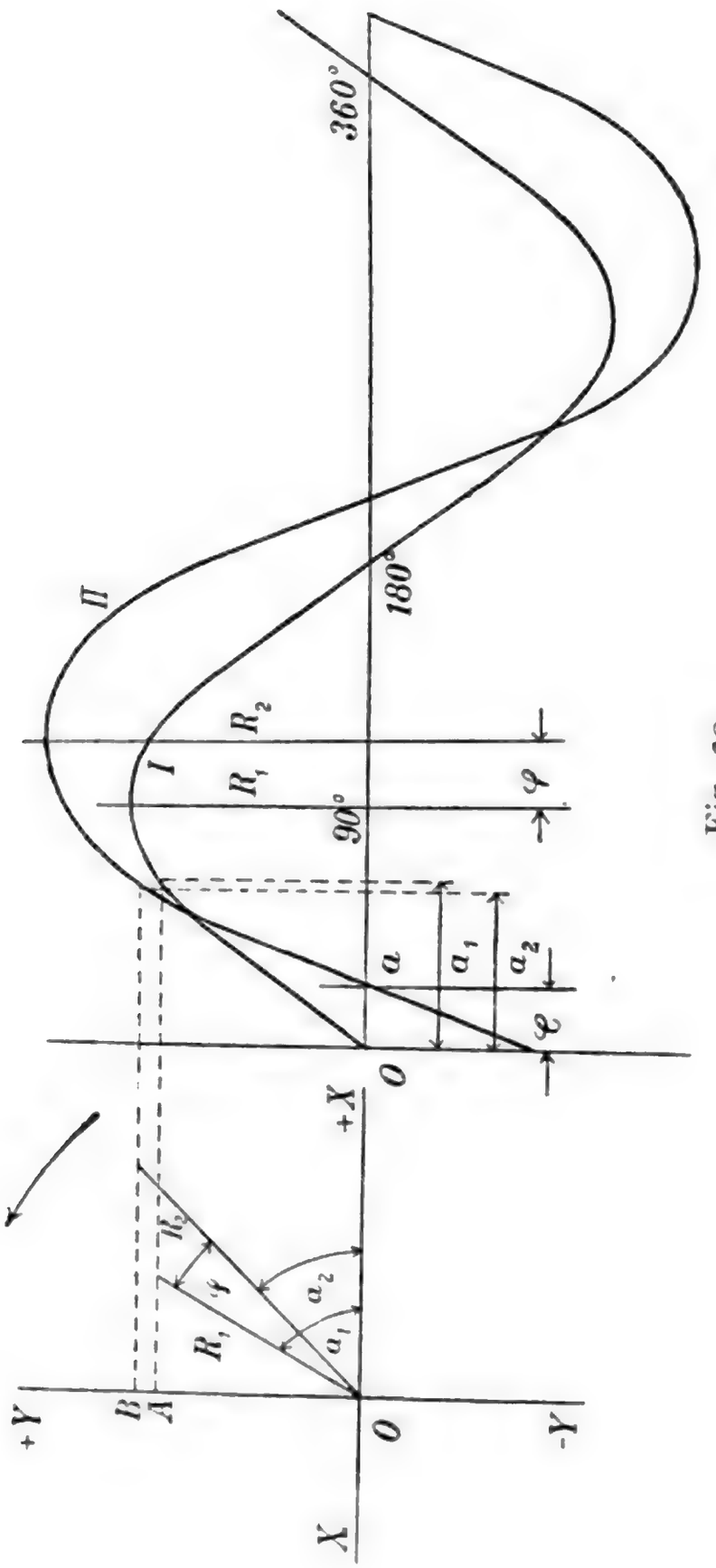


Fig. 20.

Digitized by Google

Zeitpunkte sind die Momentwerte der entsprechenden Wechselgrößen

$OA = R_1 \sin \alpha_1$ beziehungsweise $OB = R_2 \sin \alpha_2$.

Aus der Figur ist ersichtlich, daß bei der gegebenen Drehungsrichtung der Vektoren, wenn OA maximal ist, OB sein Maximum noch nicht erreicht hat, sondern es erst dann wird, nachdem OA seine dem Maximum entsprechende Lage um den Winkel $\alpha_1 - \alpha_2 = \varphi$ verlassen hat. φ ist der Phasenverschiebungswinkel.

Der Übergang vom Uhrzeigerdiagramm zum Wellendiagramm läßt sich folgendermaßen durchführen.

In jedem Zeitpunkte besteht zwischen dem Moment- und Maximalwert jener Zusammenhang, der durch obige Gleichungen gegeben ist. Den beiden Wechselgrößen werden daher im Wellendiagramm zwei Sinuslinien entsprechen, welche aber in der Phase gegeneinander um den Winkel φ verschoben sind. Wir müssen also ein rechtwinkliges Koordinatensystem bilden, auf dessen Abscissenachse die Phasenwinkel, auf die Ordinatenachse dagegen die veränderlichen Wechselstromgrößen aufzutragen sind. Nun wählen wir als Nullage jene Lage, welche der Vektor R_1 einnimmt, wenn er in der positiven Hälfte der Abscissenachse liegt und dementsprechend bekommen wir im Wellendiagramm den Null- oder Anfangspunkt.

Einer Periode entspricht eine volle, also 360^0 betragende Umdrehung des Radiusvektors, dementsprechend wird auch die Abscissenachse im Wellendiagramm für eine Periode in 360 gleiche Teile geteilt. Ein Teil entspricht also 1^0 Drehung des Radiusvektors.

Nach diesen Ausführungen können wir nun zur Bestimmung der Sinuskurven schreiten. Wenn R_1 in der $+X$-Achse liegt, ist der Momentwert der

Digitized by Google

Wechselstromgröße Ø, d. h. O ist der Anfangspunkt der Kurve I. Nach 90° Rotation ist R_1 in $+Y$, folglich der Momentwert gleich dem Maximalwerte, im Wellendiagramm wird also auf die zum 90° gehörende Ordinate der Radiusvektor aufgetragen. In der nachfolgenden Periode der Bewegung von $\alpha = 90^0$ bis $\alpha = 180^0$ ändert sich die Wechselgröße in derselben Weise, wie bisher, nur mit entgegengesetzter Tendenz, d. h. während im ersten Viertel der Periode die Momentwerte stetig zunahmen, nehmen sie jetzt stetig ab und wird der Momentwert bei $\alpha = 180^0$ Null.

Hiermit ist auch die halbe Welle bestimmt, denn wir kennen ihre Nullpunkte, die Lage des Maximalwertes und wissen, daß die Kurve eine Sinuslinie ist. Die zweite Periodenhälfte wird der ersten ähnlich bestimmt, nachdem aber der Radiusvektor von $\alpha = 180^0$ bis $\alpha = 360^0$ immer unter der Abscissenachse bleibt, sind die Momentwerte alle negativ und dementsprechend ergänzt sich die Sinuskurve mit der negativen halben Welle. Nach 360° ist der Momentwert wieder Null, von diesem Punkte angefangen wiederholen sich die bereits beschriebenen Verhältnisse.

Nachdem die Sinuskurve und das Uhrzeigerdiagramm dieselben Verhältnisse der Änderungen der Wechselgrößen darstellen, müssen sie für jeden Zeitpunkt die Momentwerte betreffend dasselbe Ergebnis liefern. Dies ist auch der Fall, denn z. B. in der eingezeichneten Radiusvektorlage ist der Momentwert für I gleich

$$O\,A = R_1 \sin \alpha_1.$$

Denselben Momentwert erhält man, wenn vom Punkte A eine mit der X-Achse parallele Projektionslinie gezogen und deren Schnittpunkt mit der Kurve I gesucht wird. Die dazugehörige Ordinate der Sinuskurve liegt bei der dem Winkel α_1 ent-

Digitized by Google

sprechenden Abscisse, ihre Größe ist mit der Ordinate $A\,O$ gleich.

Das eben ausgeführte steht auch für den zweiten Radiusvektor R_2, mit dem Unterschiede, daß diesem Vektor entsprechende Sinuskurven ihren Nullpunkt im Wellendiagramm nicht bei $\emptyset$, sondern bei a hat, wo a vom Punkte $\emptyset$ in der Entfernung des Phasenverschiebungswinkels φ liegt. Die Perioden sind bei beiden Wechselgrößen gleich, da die Vektoren mit gleicher Winkelgeschwindigkeit rotieren, R_2 erreicht also nach R_1 seinen Maximalwert, der Phasenunterschied zwischen den Lagen der Maximalwerte ist auch wie zuvor φ.

Eine dritte graphische Darstellungsweise der Wechselgrößen geschieht durch das Polardiagramm. Ihr Prinzip besteht darin, daß eine Gerade $O\,A$ (Fig. 21) um einen ihrer Endpunkte, welcher fix steht, in diesem Falle also um O mit konstanter Geschwindigkeit rotiert, und mit den Geraden $O\,B$ den Veränderungswinkel φ bildet. Während der Rotation gleitet auf $O\,A$ ein Punkt P, welcher eine dem Verlaufe der Wechselgröße entsprechende Kurve beschreibt. So entsteht das Polardiagramm, welches aus einer in sich geschlossenen Kurve besteht. Der Veränderungswinkel φ wächst von o° bis π, und dementsprechend schließt sich das Polardiagramm zur vollständigen Kurve, sobald $\varphi = \pi$ wird. In Fig. 22 ist ein solches Polardiagramm dargestellt.

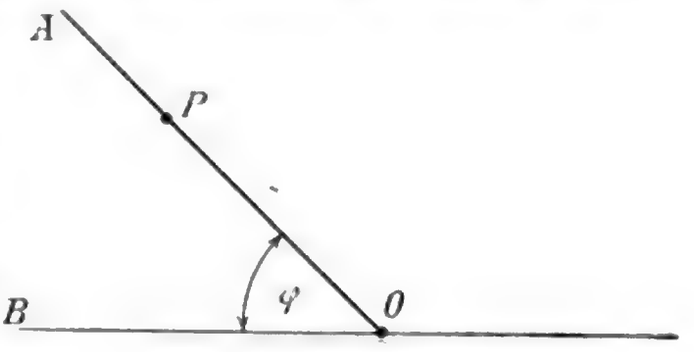


Fig. 21.

Sehen wir nun ein Beispiel, um die Behandlung der erörterten graphischen Darstellungsweisen zu illustrieren.

Digitized by Google

Es sei mit den drei graphischen Methoden der Zusammenhang zwischen der effektiven und der maximalen elektromotorischen Kraft zu bestimmen.

Wir sahen, daß der effektive Wert die Quadratwurzel aus dem Mittelwerte der Quadrate der Momentwerte ist, d. h. z. B. bei der EMK:

$$e_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e^2 \, d\alpha}$$

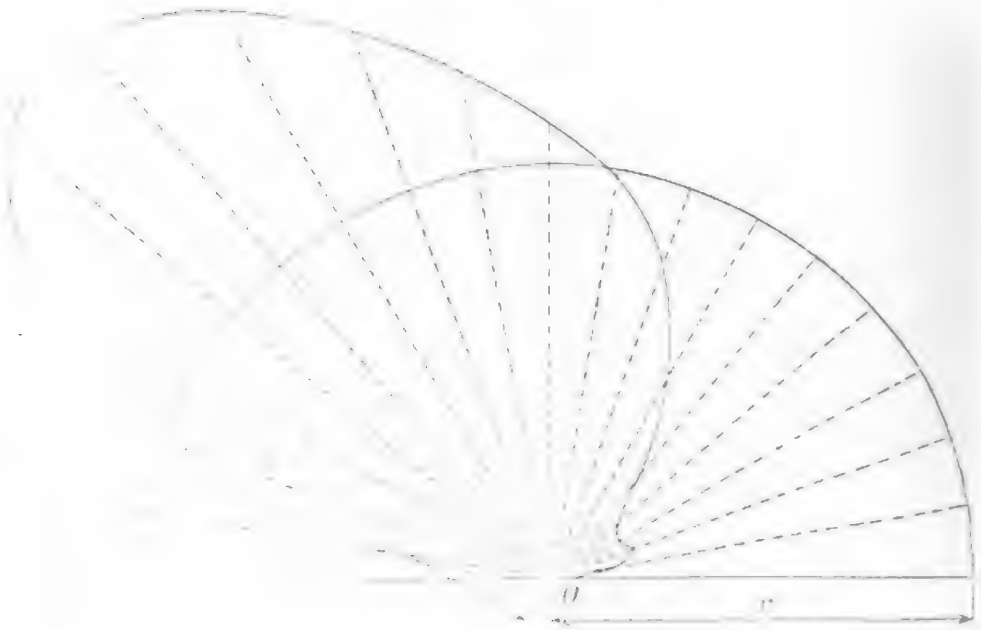


Fig. 22.

und die Beziehung zum Maximalwerte ergab sich als:

$$e_{eff} = \frac{E}{\sqrt{2}}.$$

Die Berechnungsweise dieses Ergebnisses beim Wellendiagramme wurde bereits auf Seite 53 durchgeführt, so daß unsere Aufgabe nur darin besteht, diese Beziehung auch mit Hilfe des Uhrzeigers und Polardiagrammes zu ermitteln.

Digitized by Google

Sei in Fig. 23 ein Uhrzeigerdiagramm der elektromotorischen Kraft gegeben. Im fraglichen Zeitpunkte ist die Lage des Vektors OA, folglich ist der Momentwert OC, da

$$OC = OA \sin \varphi$$

oder

$$e = E \sin \varphi$$

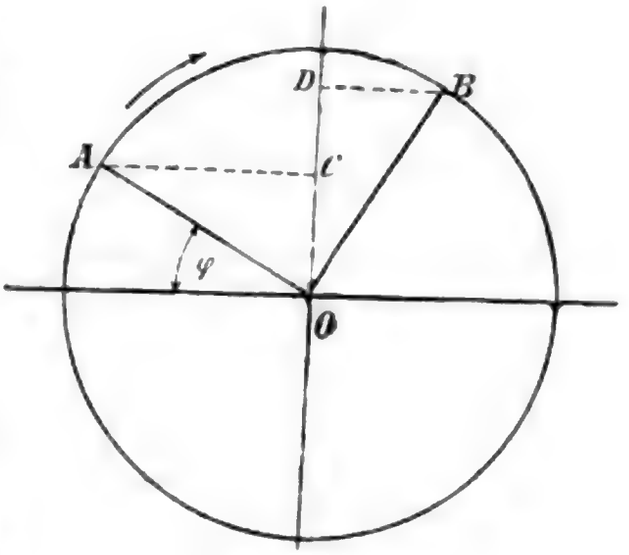


Fig. 23.

Bei periodischen Änderungen, welche dem Sinusgesetz folgen, findet man immer zwei Momentwerte, bei denen die Summe ihrer Quadrate gleich dem Quadrate des Maximalwertes ist. Solche zusammengehörige Werte nennt man konjugierte Momentwerte.

Zum Beweise dessen führen wir folgende Berechnung durch:

In Fig. 23 sei OB senkrecht auf OA und $OA = OB = E$. Der zu OB gehörige Momentwert ist $OD = OB \sin (90 + \varphi)$ oder

$$OD = e_1 = E \sin (90 + \varphi) = E \cos \varphi.$$

Die Quadrate dieser Momentwerte werden

$$e^2 = E^2 \sin^2 \varphi$$
$$e_1^2 = E^2 \cos^2 \varphi$$

folglich ihre Summe

$$e^2 + e_1^2 = E^2 (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) = E^2,$$

d. h. e und e_1 sind konjugierte Werte.

Mit 2 dividiert, bekommt man:

$$\frac{1}{2}(e^2 + e_1^2) = \frac{1}{2} E^2.$$

Digitized by Google

In dieser Gleichung ist die linke Seite der Mittelwert aus den Quadraten der Momentwerte, ziehen wir also die Quadratwurzel, dann bekommen wir den Ausdruck für die effektive elektromotorische Kraft, und zwar

$$e_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2}(e^2 + e_1^2)} = \frac{E}{\sqrt{2}}$$

womit die gesuchte Beziehung beim Uhrzeiger- oder Vektordiagramm gefunden ist.

Will man dieselbe Beziehung beim Polardiagramm bestimmen, so verfährt man folgendermaßen:

In Fig. 22 wird der Flächeninhalt des Polardiagrammes mit dem Flächeninhalte eines Halbkreises gleichgesetzt, dessen Halbmesser r und Mittelpunkt O ist.

Um die durch das Polardiagramm umschlossene Fläche bestimmen zu können, nimmt man eine unendlich kleine Fläche derselben in Betracht und stellt für die ganze Fläche eine Integralformel auf.

In einem gegebenen Zeitpunkt sei die Lage des Vektors OA und der dazugehörige Veränderungswinkel φ. Rotiert der Vektor um den unendlich kleinen Winkel $d\varphi$ weiter, dann wird seine Länge um einen differentialen Betrag größer und die beschriebene Fläche (Fig. 24)

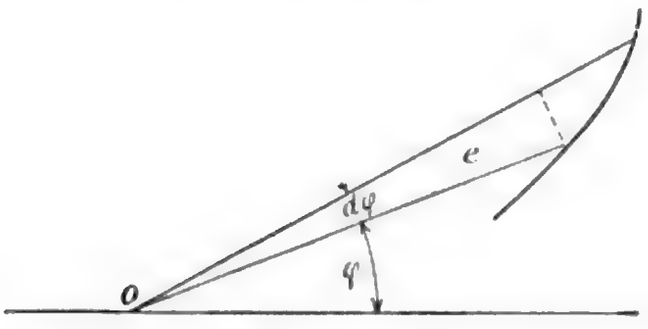


Fig. 24.

$$dF = \frac{1}{2} e^2 \, d\varphi$$

wenn man diese Fläche als ein Dreieck betrachtet. Dies kann man nur dann tun, wenn die Kurve dies zuläßt, bei komplizierten Kurven muß man die aufeinanderfolgenden

Digitized by Google

Punkte so naheliegend wählen, daß der Kurventeil ohne größeren Fehler als eine Gerade betrachtet werden kann.

Die ganze Fläche des Polardiagrammes bekommt man, wenn man obigen Ausdruck von $\emptyset$ bis π integriert, d. h.

$$F = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} e^2 d\varphi.$$

Diese Fläche soll mit jener des Halbkreises gleich sein, also

$$F = \frac{r^2 \pi}{2} = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} e^2 d\varphi.$$

Hieraus wird:

$$r^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e^2 d\varphi$$

oder

$$r = e_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e^2 d\varphi}.$$

Der letzte Ausdruck gibt die effektive elektromotorische Kraft laut der auf Seite 51 aufgestellten Definition.

Bei der Behandlung der Wechselstromprobleme auf graphischem Wege lassen sich alle drei Methoden gut benutzen, am allgemeinsten arbeitet man aber mit dem Uhrzeiger- oder Vektordiagramm, weshalb auch wir in den nachfolgenden graphischen Darstellungen stets diese Methode benutzen werden.

Summation periodisch veränderlicher Größen.

Bei der Summation periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode verfährt man in derselben Weise, als bei der Zusammensetzung der Kräfte oder Geschwindigkeiten. Wenn zwei Vektor-

Digitized by Google

größen gegeben sind, welche einen Phasenunterschied haben, dann bildet man in der üblichen Weise ein Vektordiagramm, die Diagonale, welche sich durch die Verbindung der Endpunkte der Komponentgrößen ergibt, wird die gesuchte resultierende Größe sein.

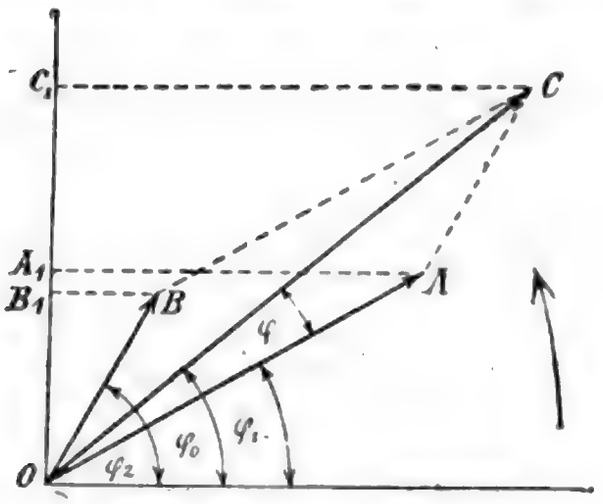


Fig. 25.

In Fig. 25 sind die beiden zusammenzusetzenden Vektoren OA und OB. Ihr Schwingungszustand ist im fraglichen Zeitpunkte durch die Phasenwinkel φ_1 und φ_2 gegeben. Die Resultierende erhält man, wenn von den Endpunkten A und B zwei zu OB, beziehungsweise zu OA parallele Geraden gezogen werden und ihr Schnittpunkt C mit O verbunden wird. Die Größe des resultierenden Vektors ist durch Carnots Formel bestimmt und zwar:

$$\overline{OC} = \sqrt{\overline{AO}^2 + \overline{OB}^2 - 2\,\overline{OA}\,\overline{OB}\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

$\varphi_2 - \varphi_1$ ist der Phasenunterschied zwischen den beiden Komponentgrößen.

Aus der Figur ist ersichtlich, daß

$$\overline{B_1C_1} = \overline{BC}\sin\varphi_1 = \overline{OA}\sin\varphi_1 = \overline{OA_1}$$

weshalb

$$\overline{OC_1} = \overline{OC}\sin\varphi_0 = \overline{OB_1} + \overline{OA_1}$$

wo φ_0 jenen Phasenwinkel bedeutet, welcher den Schwingungszustand der Resultante im fraglichen Zeitpunkt bestimmt.

Bei der angegebenen Drehrichtung der Vektoren eilt $\overline{OB}$ in der Phase zu $\overline{OA}$ um den Winkel

Digitized by Google

$(\varphi_2 - \varphi_1)$ vor. Die Resultante bildet mit $\overline{OA}$ den Phasenwinkel φ, wobei $\varphi_0 = \varphi + \varphi_1$. Es ist ersichtlich, daß $\overline{OC}$ zu $\overline{OA}$ in der Phase eilt, zu $\overline{OB}$ dagegen in der Phase zurückbleibt. Je größer eine Komponente, um so näher liegt zu ihr die Resultante und um so näher kommt ihr Wert zu jener der Komponente.

Wenn man Vektorgrößen zu summieren hat, darf man nur dann algebraische Summation vornehmen, wenn die Vektoren keinen Phasenunterschied oder einen solchen von 180° haben, denn nur in diesen zwei Fällen liegen die Komponenten in einer und derselben Geraden mit der Resultante. In allen anderen Fällen muß eine geometrische Addition stattfinden und in diesen Fällen können algebraische Summen nur aus den Vertikalprojektionen gebildet werden, oder mit anderen Worten:

Bei periodisch veränderlichen Größen von gleicher Periode und gegebenem Phasenunterschiede können nur die Momentwerte algebraisch summiert werden. Für die Maximalwerte ist die geometrische Zusammensetzung der Komponenten zu benutzen.

Sind mehrere periodisch veränderliche Größen von gleicher Periode durch ihre Vektoren gegeben (Fig. 26), dann verfährt man in der Weise, daß man zuerst zwei Vektoren, I und II, zu einer Resultierenden R_1 zusammensetzt, dann R_1 mit III zu R_2 vereinigt u. s. w., bis auch die letzte Komponente zur Bildung von einer Resultierenden benutzt ist. Die letzte resultierende ist die gesuchte resultierende Vektorgröße aller Komponentenvektoren.

Betrachten wir die Lagen der Punkte $O\,A\,B\,C\,D\,E$, so sehen wir, daß der resultierende Vektor auch bestimmt werden kann, ohne die Zwischenresul-

Digitized by Google

tierenden $R_1\, R_2 \ldots R_4$ kennen zu müssen. Man bildet durch Parallelen mit den einzelnen Vektoren das Vektorpolygon $O\, A_1\, B_1\, C_1\, D_1\, E_1$ und verbindet O mit E_1. Diese Schlußlinie wird die gesuchte Resultante sein, ihre Größe, Lage und Richtung ist vollkommen bestimmt. Die Richtung ist dadurch gegeben, daß sie mit der Richtung der Komponenten entgegengesetzt ist, gerade so, wie bei der Zusammensetzung der Kräfte oder Geschwindigkeiten. Wenn also in unserem Falle die Richtung

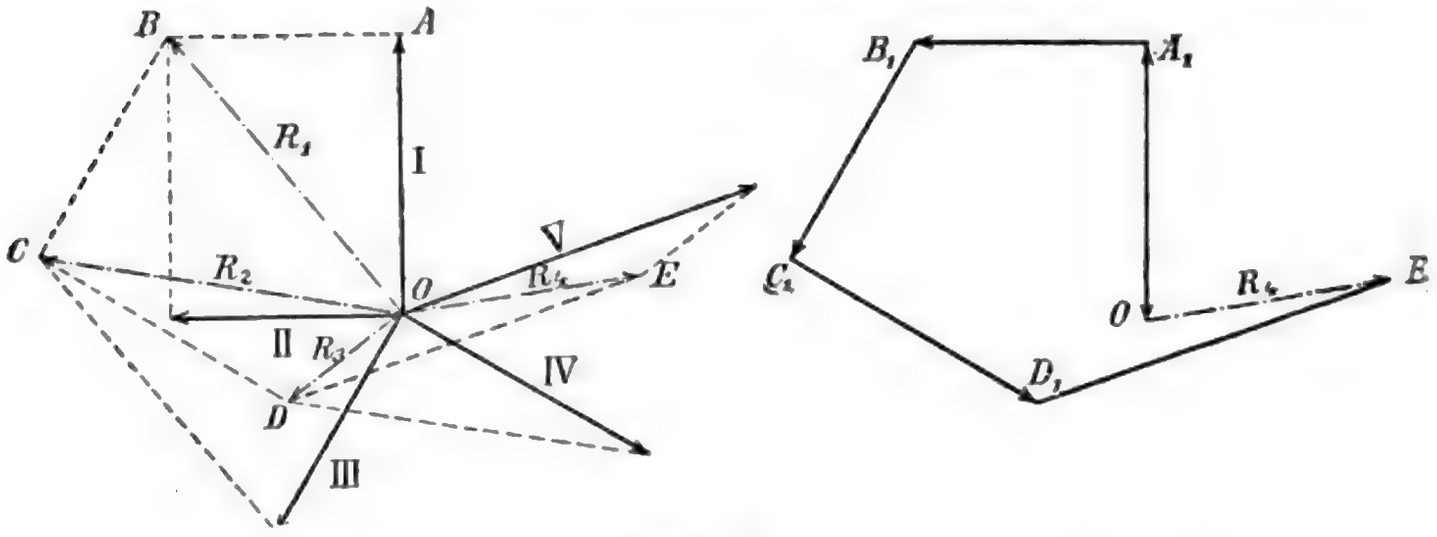


Fig. 26.

der Komponenten im Vektorpolygon der Richtung der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt ist, wird die Richtung der resultierenden R_4 durch den eingezeichneten Pfeil gegeben.

Aus Fig. 25 ist ersichtlich, daß

$$O\, C_1 = O\, C \sin \varphi_o = O\, A \sin \varphi_1 + O\, B \sin \varphi_2.$$

Sind daher mehrere Vektoren gegeben, welche verschiedene Phasenwinkel haben, dann wird der resultierende Vektor durch folgende zwei Gleichungen bestimmt:

$$R_n \sin \varphi_n = \sum_1^n r_i \sin \varphi_i$$

Digitized by Google

und

$$R_n \cos \varphi_n = \sum_1^n r_i \cos \varphi_i$$

wo i die Anzahl der Komponenten, φ_i die entsprechenden Phasenwinkel, φ_n aber den Phasenwinkel des resultierenden Vektors bedeutet.

Die Größe dieses Winkels kann aus obigen Gleichungen bestimmt werden, und zwar wird:

$$tg\ \varphi_n = \frac{\sum_1^n r_i \sin \varphi_i}{\sum_1^n r_i \cos \varphi_i}$$

Bei der Bildung des Produktes von periodisch veränderlichen Größen verfährt man in derselben Weise wie bei der Summation. Man bildet die Momentwerte, das Produkt dieser Werte gibt im fraglichen Zeitpunkte das gesuchte Ergebnis. Sind zwei Momentwerte durch die Ausdrücke

$$e_1 = E_1 \sin \varphi_1$$

und

$$e_2 = E_2 \sin \varphi_2$$

gegeben, dann ist in diesem Zeitpunkte das Produkt beider veränderlichen Größen

$$e_1 e_2 = e = E_1 E_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2.$$

Ist $e_1 = e_2 = e_o$ und $E_1 = E_2 = E_o$ und sind beide Größen in gleicher Phase, d. h. $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_o$, dann nimmt obiger Ausdruck die einfachere Form an:

$$e_o^2 = E_o^2 \sin^2 \varphi_o.$$

Das ist der Fall, wenn das Quadrat einer periodisch veränderlichen Größe gebildet wird, wie es wir auch auf Seite 52 getan haben, um die Be-

Digitized by Google

ziehung zwischen der effektiven und der maximalen elektromotorischen Kraft finden zu können.

Der besseren Übersichtlichkeit halber wollen wir die Summation und die Multiplikation zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode vornehmen.

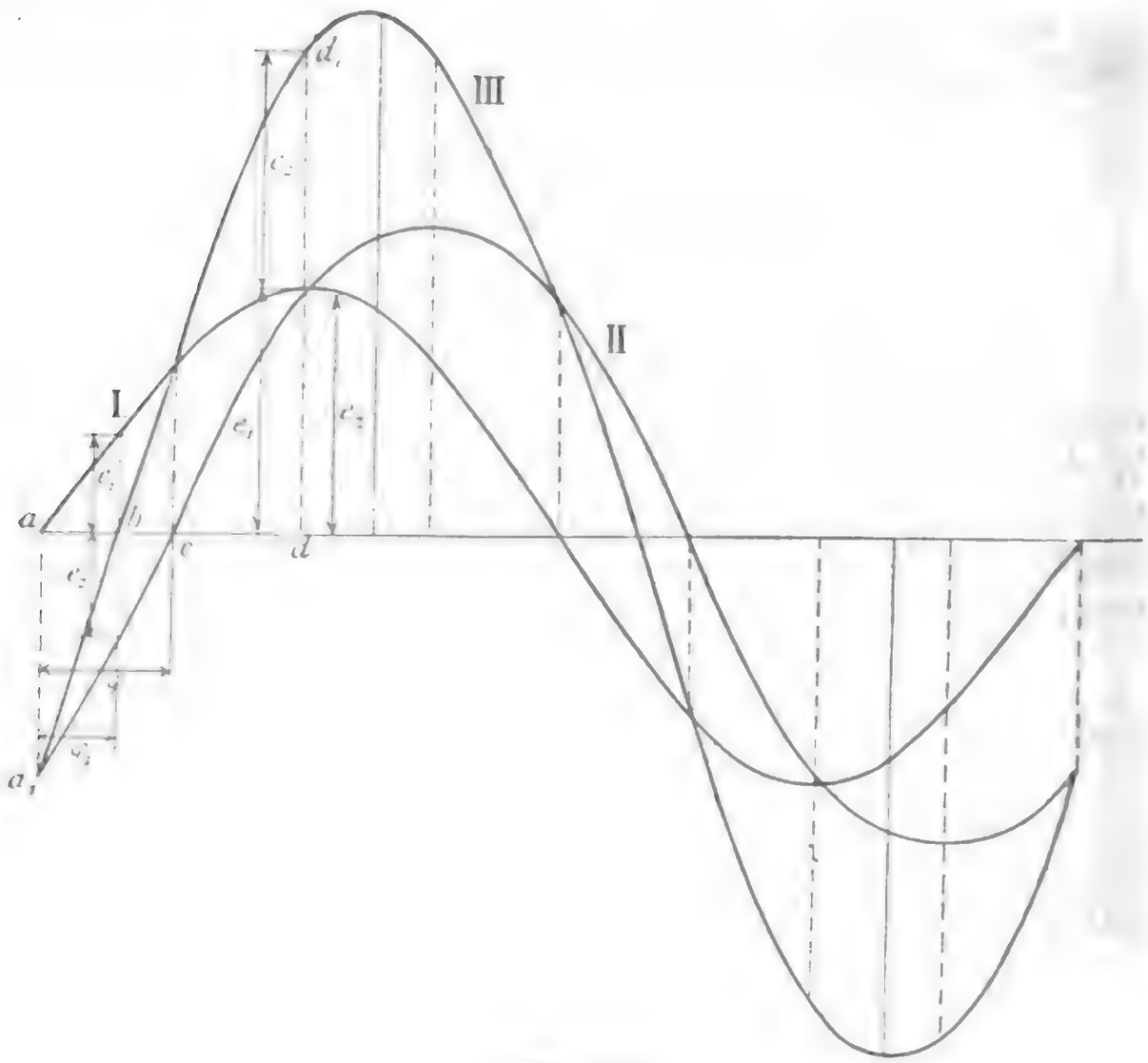


Fig. 27.

In Fig. 27 seien I und II die Sinuskurven der zu summierenden Wechselgrößen.

Wir wissen, daß bei Wechselgrößen nur die zu demselben Zeitpunkte gehörenden Momentwerte summiert werden können und dementsprechend müssen wir die Summation der durch I und II dargestellten veränderlichen Größen bewerkstelligen.

Digitized by Google

Nehmen wir an, daß die Momentwerte von I und II e_1, beziehungsweise e_2 sind. Im Zeitpunkte a ist $e_1 = o$ und e_2 negativ, folglich wird ein Punkt der resultierenden Kurve mit a_1 zusammenfallen und negativen Wert besitzen. Im Diagramm nimmt man immer die obere Hälfte als positiv, die untere dagegen als negativ an. Sind e_1 und e_2 einander gleich, aber in ihrem Vorzeichen entgegengesetzt, dann ist ihre Summe Null und die resultierende Kurve schneidet die horizontale Achse. Dieser Lage entspricht Punkt b.

Weitergehend sehen wir, daß bei $\underline{c}$ $e_2 = o$ und e_1 einen positiven Wert hat, dementsprechend schneidet in der zu $\underline{c}$ gehörenden Vertikalen die resultierende Kurve III die Sinuslinie I. Bei d sind sowohl e_1, als auch e_2 positiv, die Summe beider ist positiv und gibt einen weiteren Punkt d_1 der Kurve III u. s. w. Im absteigenden Teile der Sinuskurven I und II geschieht die Summation in derselben Weise wie zuvor und dasselbe steht für die negativen Halbwellen. Bei diesen letzteren summieren sich negative Werte, man erhält ein negatives Maximum, von welchem die resultierende Kurve wieder stetig dem Nullpunkte sich nähert. Überall da, wo eine Kurve die Abscissenachse schneidet, fällt der entsprechende Punkt der resultierenden Kurve mit einem Punkte der anderen Kurve zusammen.

Die Multiplikation periodisch veränderlicher Größen auf graphischem Wege ist in Fig. 28 dargestellt. Die gegebenen Kurven sind I und II. Die Momentwerte für jeden Zeitpunkt müssen miteinander multipliziert werden, wenn also der eine Momentwert Null ist, dann wird auch das Produkt Null und die resultierende Kurve III schneidet die Abscissenachse. Während bei der Summation die Nullpunkte der Kurve III zwischen die zwei Nullpunkte der gegebenen Kurven fallen, liegen

bei der Multiplikation der periodischen Größen die Nullpunkte der resultierenden Kurve mit denen der Kurven I und II zusammen.

Bei der Konstruktion der Kurve III verfährt man folgendermaßen. Man wählt für die Momentwerte einen Maßstab und multipliziert in den einzelnen Zeitpunkten die zwei zusammengehörenden

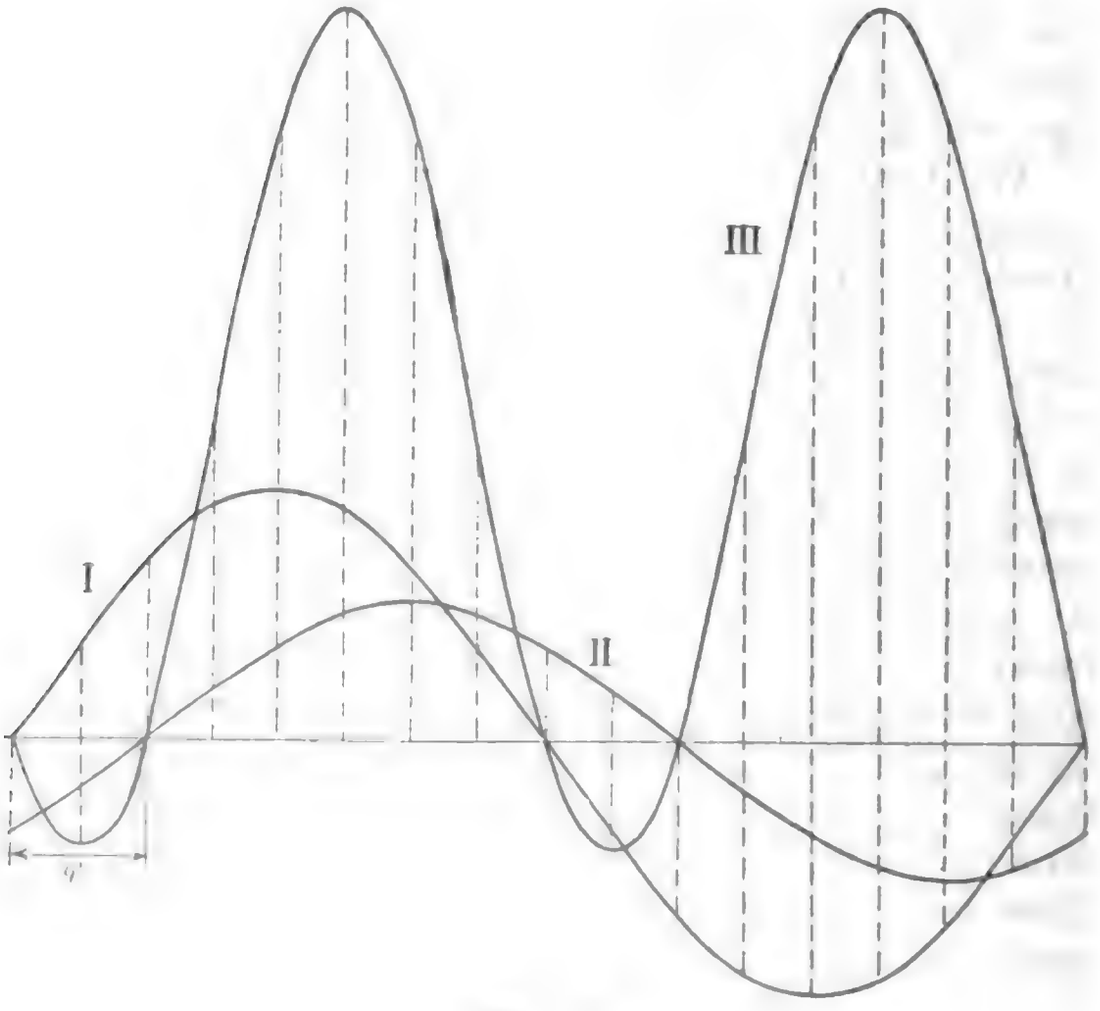


Fig. 28.

Momentwerte. Das Produkt trägt man im gewählten Maßstabe auf und erhält dadurch einen Punkt der gesuchten Kurve.

Aus der Figur ist ersichtlich, daß positive und negative resultierende Kurventeile sich ergeben. Wenn der eine Momentwert im positiven, der dazugehörige dagegen im negativen Teile des

Digitized by Google

Diagrammes liegt, dann ist ihr Produkt negativ und die resultierende Kurve liegt unterhalb der Abscissenachse. Bei gleichen Vorzeichen, wenn also beide Momentwerte positiv oder negativ sind, ist ihr Produkt positiv und dieser Teil der resultierenden Kurve liegt oberhalb der Abscissenachse.

Bei allen diesen Zusammensetzungen der Wechselgrößen dürfen wir nicht vergessen, daß diese Verhältnisse nur dann bestehen, wenn die periodisch veränderlichen Größen von gleicher Periode sind und in ihren Änderungen dem Sinusgesetze folgen.

Bestimmung des Arbeitseffektes eines Wechselstromes.

Wie bekannt, ist bei Gleichstrom die auf die Zeiteinheit fallende Arbeit, der Effekt durch die Formel gegeben

$$W = e\,i$$

wenn e die elektromotorische Kraft, i die Stromstärke bedeutet. Will man also bei Gleichstrom den Effekt messen, dann mißt man den Wert der elektromotorischen Kraft in Volt, die Stromstärke in Ampère, bildet das Produkt beider und erhält den gesuchten Effekt in Watt.

Bei Wechselströmen würde diese Berechnungsweise nur dann zu richtigen Ergebnissen führen, wenn die elektromotorische Kraft und die Stromstärke keine Phasendifferenz haben, d. h. wenn beide zu gleichen Zeiten ihre Null- beziehungsweise Maximalwerte erreichen, denn nur in diesem Falle treten in den einzelnen Zeitpunkten jene zusammengehörigen Momentwerte auf, deren einfaches, nach obiger Formel gebildetes Produkt den richtigen Wert des Effektes ergibt.

Digitized by Google

Dieser Fall ist aber bei den Wechselströmen sehr selten, denn es treten gewöhnlich störende Ursachen auf, die eine Phasenverschiebung zwischen der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke verursachen. Wir müssen daher eine allgemeinere Form des Ausdruckes des Arbeitseffektes finden, welche nicht nur für den Fall der Phasengleichheit, sondern auch dann Giltigkeit hat, wenn zwischen

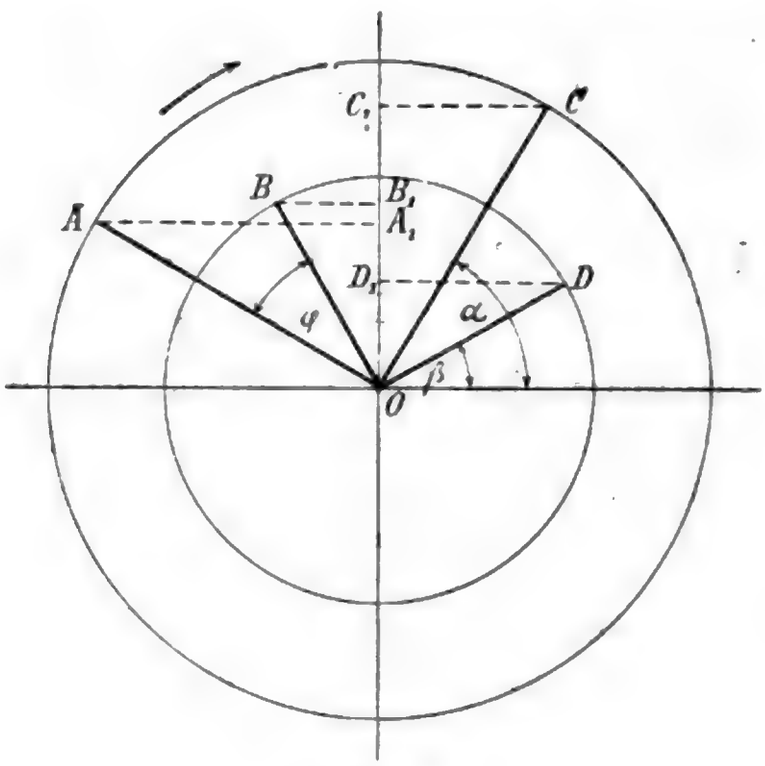


Fig. 29.

Strom und elektromotorischer Kraft eine Phasenverschiebung besteht.

Bei der Ableitung dieser Formel gehen wir wieder, wie bei der Bestimmung des effektiven Wertes, von den konjugierten Werten aus. Seien in Fig. 29 der Stromstärke $\overline{OA}$ und der elektromotorischen Kraft $\overline{OB}$ entsprechende konjugierte Werte $\overline{OC}$, beziehungsweise $\overline{OD}$. Die Phasendifferenz zwischen beiden ist φ, und zwar bei den eingezeichneten Winkelgrößen wird

Digitized by Google

$$\varphi = \alpha - \beta$$

da

$$\overline{OC} \perp \overline{OA} \text{ und } \overline{OD} \perp \overline{OB}$$

ist.

Im angegebenen Zeitpunkte sind die Momentwerte

$$\overline{OD_1} = e = \overline{OD} \sin\beta = E_{max} \sin\beta$$

und

$$\overline{OC_1} = i = \overline{OC} \sin\alpha = J_{max} \sin\alpha$$

da die Vektoren die Maximalwerte der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke bedeuten.

Der Arbeitseffekt wird durch das Produkt der beiden letzten Gleichungen für den fraglichen Zeitpunkt gegeben, also

$$A = e\,i = E_{max} \sin\beta\, J_{max} \sin\alpha.$$

Um den Wert des Effektes für eine Periode finden zu können, stellen wir dieselben Gleichungen auch auf die konjugierten Werte auf, also

$$\overline{OB_1} = e' = \overline{OB} \sin(90^0 + \beta) = E_{max} \cos\beta$$

beziehungsweise

$$\overline{OA_1} = i' = \overline{OA} \sin(90^0 + \alpha) = J_{max} \cos\alpha.$$

Der Momentwert der Arbeit in diesem Falle wird:

$$A' = e'\,i' = E_{max} \cos\beta\, J_{max} \cos\alpha.$$

Die Summe der so erhaltenen Arbeitseffekte ist

$$A + A' = ei + e'i' = E_{max} J_{max} \sin\alpha \sin\beta + E_{max} J_{max} \cos\alpha \cos\beta$$

oder

$$A + A' = E_{max} J_{max} (\sin\alpha \sin\beta + \cos\alpha \cos\beta).$$

Da aber

$$(\sin\alpha \sin\beta + \cos\alpha \cos\beta) = \cos(\alpha - \beta) = \cos\varphi$$

wird

$$A + A' = e\,i + e'\,i' = E_{max}\,J_{max}\cos\varphi.$$

Die rechte Seite dieser Gleichung ist bei konstanter Phasenverschiebung konstant, was also besagt, daß die Summe der Arbeitseffekte von konjugierten Werten eine konstante Größe ist. Verändert sich φ, der Phasenverschiebungswinkel, dann wird diese Konstante eine andere, sie bleibt jedoch für ein und dieselbe Phasenverschiebung unveränderlich.

Der gesuchte Effekt des Wechselstromes ist der Mittelwert der Momenteffekte, also:

$$W = \frac{e\,i + e'\,i'}{2} = \frac{E_{max}\,J_{max}\cos\varphi}{2}.$$

Anders geschrieben, wird:

$$W = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}\,\frac{J_{max}}{\sqrt{2}}\cos\varphi$$

d. h.

$$W = e_{eff}\,i_{eff}\cos\varphi.$$

Hieraus ersieht man, daß der Effekt eines Wechselstromes bei gegebener Phasenverschiebung dadurch ermittelt wird, daß man das Produkt der effektiven elektromotorischen Kraft mit der Stromstärke bildet und den so erhaltenen Wert mit dem Cosinus des Phasenverschiebungswinkels multipliziert.

Obige Gleichung ist die allgemeine Form des Effektausdruckes. Der Faktor $\cos\varphi$, von welchem der Wert der Leistung des Stromes abhängt, heißt der Leistungsfaktor.

Digitized by Google

Sind die Stromstärke und die elektromotorische Kraft in Phase, dann wird $\varphi = o$ und $cos\,\varphi = 1$. In diesem Falle wird der Effekt in derselben Weise berechnet wie bei Gleichstrom, d. h.

$$W = e_{eff}\, i_{eff}.$$

Die Leistung wird mit dem Wattmeter gemessen, welcher aus einer fixen und einer beweglichen Spule besteht. Letztere ist auf die Ebene der fixen Spule senkrecht, ist mit einer Torsionsfeder versehen und kann hierdurch eine der dynamischen Wirkung entgegengesetzte Torsionskraft entfaltet werden. Die fixe Spule ist in den Hauptstromkreis geschaltet, die bewegliche Spule wird an die beiden Punkte angelegt, zwischen welchen die Leistung zu ermitteln ist. Da die bewegliche Spule induktionsfrei und von großem Widerstande ist, wird die durch sie fließende Stromstärke mit der Spannung proportional sein und mit ihr in Phase bleiben, während in der Hauptspule ein den Verhältnissen entsprechender, in der Phase zur Spannung verschobener Strom fließt. Die dynamische Wirkung wird demnach dem Effekte proportional sein, und nachdem diese dynamische Wirkung durch die Torsionswirkung der Feder kompensiert wird, kann die Größe der erteilten Torsion, d. h. der Torsionswinkel zur Berechnung des Wechselstromeffektes benutzt werden.

In Fig. 30 sind e und i die Sinuskurven der veränderlichen Wechselspannung, beziehungsweise Stromstärke, welche in gleicher Phase sind, bei welchen also $cos\,\varphi = 1$.

w stellt die Effektkurve dar, jene Kurve, welche aus den jeweiligen Produkten der Momentwerte der Stromstärke und elektromotorischen Kraft entsteht. Diese Kurve hat einen Maximalpunkt ober den zusammenfallenden Maximalwerten von e und i, ihre Nullpunkte fallen auch mit jenen von

e und *i* zusammen. Das Wattmeter zeigt dementsprechend eine mittlere Leistung an, welche aus Fig. 30 bestimmt werden kann, wenn man die Fläche der beiden Kurventeile von *w* einem Parallelogramm gleich setzt, dessen Länge gleich der

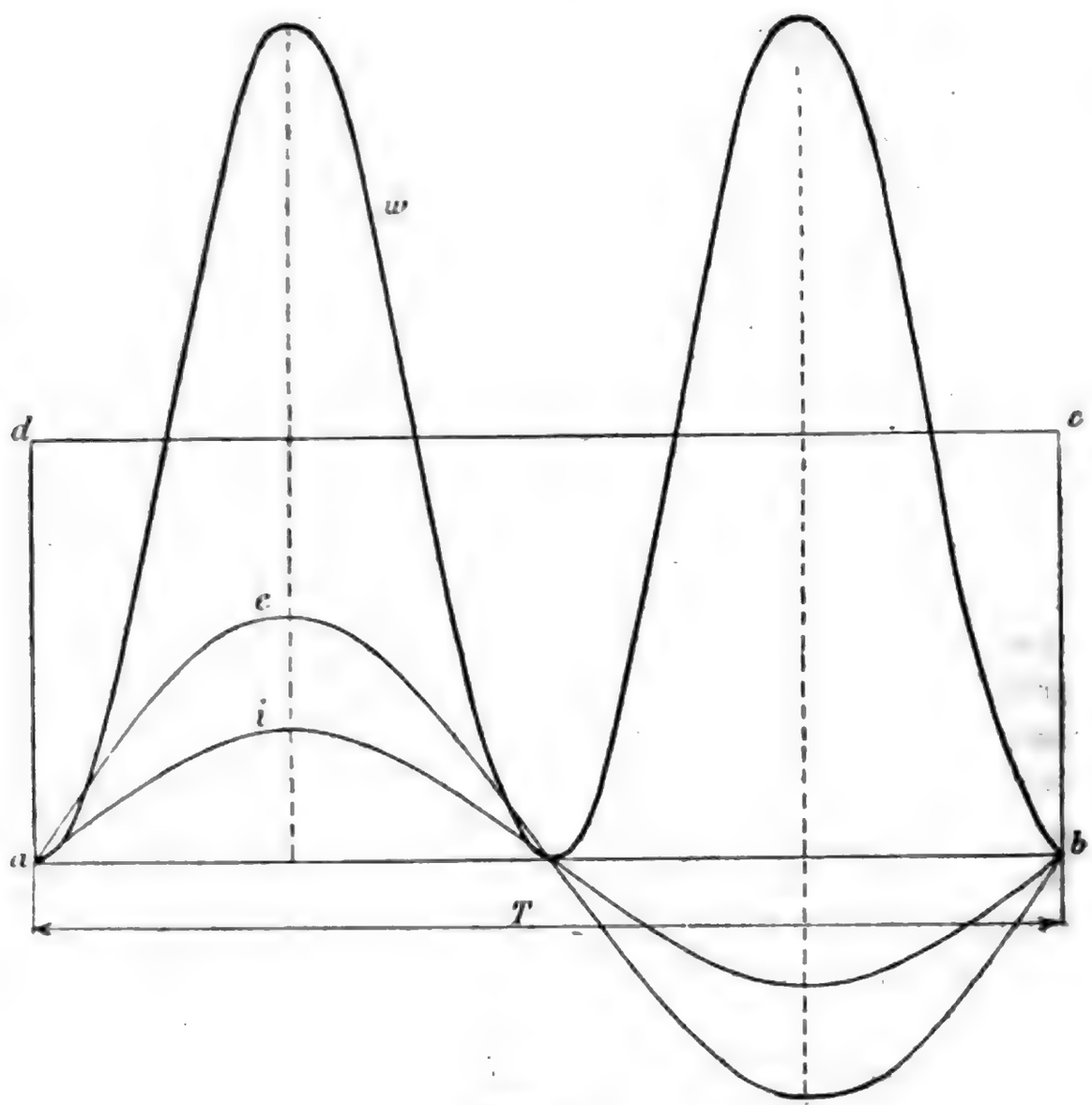


Fig. 30.

vollen Periode *T* der Wechselgrößen ist. Die Fläche der Kurve *w* ist mit der geleisteten effektiven Arbeit gleich, da ihre Ordinaten für jeden Zeitpunkt die effektive Leistung angeben, folglich wird die Höhe *b c* des Parallelogramms jenen Mittelwert der Leistung angeben, welchen das Wattmeter mißt.

Digitized by Google

Ist zwischen dem Strome und der elektromotorischen Kraft eine Phasenverschiebung von der Größe φ, dann ändern sich die Verhältnisse insofern, daß außer positiven Effekten auch negative entstehen. Die diesbezüglichen Kurven sind in Fig. 28 dargestellt. I stellt die Änderung der elektromotorischen Kraft, II jene der Stromstärke vor, während III die Effektkurve ist. Es ist zu ersehen, daß letztere auch Teile hat, welche unter der Abscissenachse liegen, d. h. negativ sind. Diese Kurventeile entsprechen jenen Fällen, in welchen die Momentwerte der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke einander entgegengesetzten Vorzeichens sind. Bei gleichen Vorzeichen ist das Produkt beider positiv und die Wattkurve liegt oberhalb der Abscissenachse.

Die unter der Abscissenachse liegenden Teile der Wattkurve schließen Flächen ein, deren Größe mit dem erwähnten negativen Effekt proportional ist. Der Gesamteffekt ergibt sich, wenn man aus den positiven Effekten die negativen subtrahiert, dies zeigt auch ein in solchen Stromkreis eingeschaltetes Wattmeter an. Der Effekt für eine Periode kann jetzt, ebenso wie im vorhergehenden Falle, mit der Höhe jenes Parallelogrammes proportional gesetzt werden, dessen Länge gleich einer Periode und dessen Flächeninhalt gleich mit jener Fläche ist, deren Größe aus der Differenz der den positiven und den negativen Effekten entsprechenden Flächen sich ergibt.

Bei gleicher elektromotorischer Kraft und Stromstärke wird der Gesamteffekt kleiner sein als im vorhergehenden Falle, seine Größe wird bei der konstanten Phasenverschiebung φ durch den Ausdruck

$$W = e_{eff}\, i_{eff} \cos\varphi$$

gegeben.

Interessant ist der Fall, wenn die Phasenverschiebung zwischen elektromotorischer Kraft und

Digitized by Google

Stromstärke gleich einer Viertelperiode wird. In diesem Falle ist $\varphi = 90^0$ und $cos\,\varphi = 0$, was soviel sagt, daß der geleistete Effekt, nach der Formel

$$W = e_{eff}\, i_{eff}\, cos\,\varphi = e_{eff}\, i_{eff}\, cos\, 90^0 = 0$$

Null ist. Es kann also jetzt die elektromotorische Kraft und die Stromstärke beliebig groß werden,

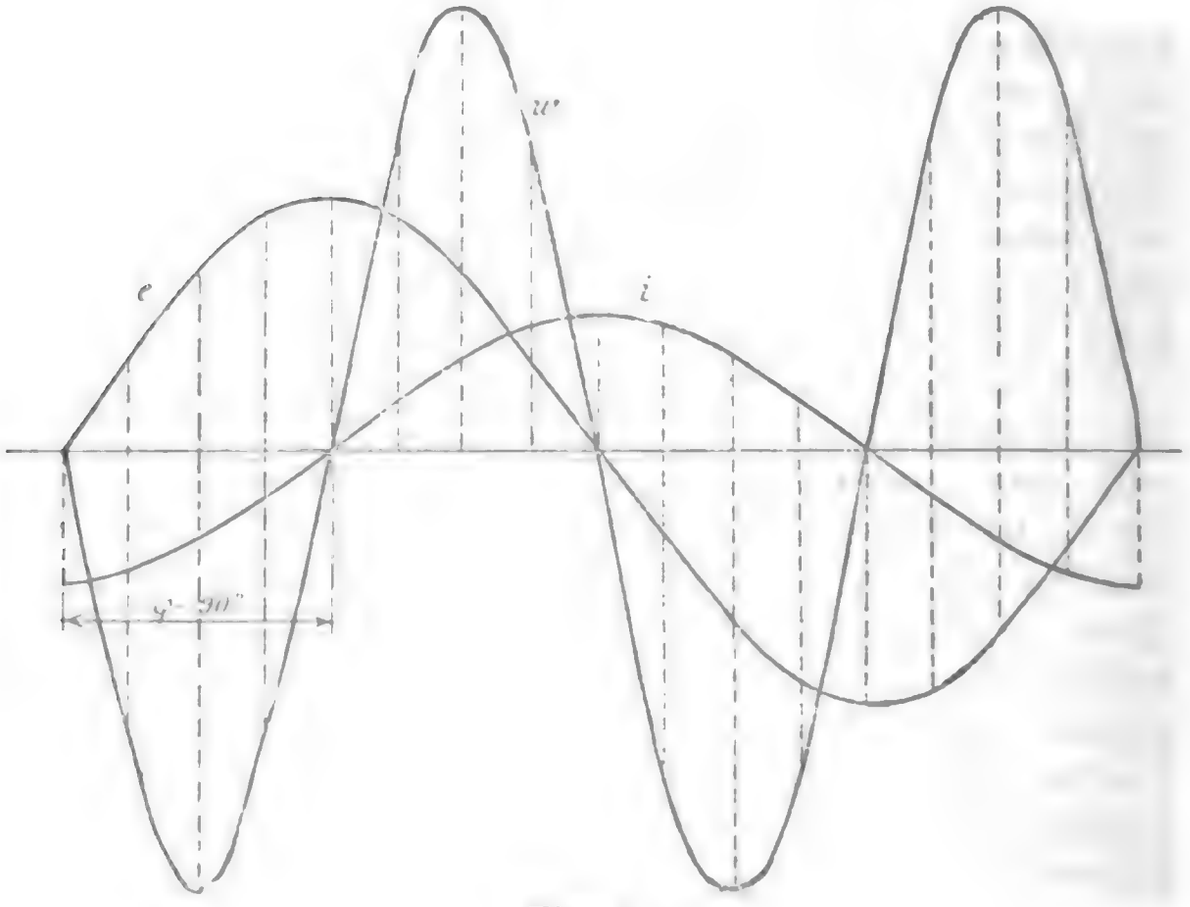


Fig. 31.

der Effekt des Wechselstromes wird Null sein, solange die Phasenverschiebung $\varphi = 90^0$, eine Viertelperiode ist, abgesehen davon, ob φ eine Phasenverspätung oder eine Phasenvoreilung bedeutet.

Graphisch diese Verhältnisse dargestellt, gelangen wir zur Fig. 31. *e* ist die Kurve der elektromotorischen Kraft, welche zur Stromstärke *i* in der Phase um eine Viertelperiode voreilt. Aus beiden Kurven wird die mit *w* bezeichnete Watt-

Digitized by Google

kurve konstruiert, welche gleich große positive und negative Teile hat. Die Differenz beider Flächenteile ergibt Null, dem zufolge auch die mittlere Leistung oder aber die Höhe des mit dieser Differenz gleichen Flächeninhalt besitzenden Parallelogrammes Null wird, da doch das Parallelogramm in diesem speziellen Falle keine Fläche haben kann.

Wir haben hier also einen Stromkreis, in welchem ein Strom fließt, der keine Arbeit leistet. Solchen Strom nennt man wattlosen Strom, jenen Strömen gegenüber, welche wirklichen Effekt leisten und Wattströme genannt werden. Die Größe des wattlosen Stromes hängt in einem Stromkreise von der Phasenverschiebung ab, je größer der Phasenverschiebungswinkel ist, um so größer ist der wattlose Strom, er erreicht sein Maximum, wenn die Phasenverschiebung 90^0 oder gleich einer Viertelperiode wird.

Die Phasenverschiebung spielt also in der Leistung eines Wechselstromes eine große Rolle, und will man eine je größere Leistung erreichen, dann muß man trachten, die Phasenverschiebung auf ein Minimum herabzudrücken.

Das Maximum der Leistung wird erreicht, wenn der Phasenwinkel Null ist, in diesem Falle ist der Effekt mit jenem Gleichstromeffekt gleich, dessen elektromotorische Kraft und Stromstärke mit den entsprechenden effektiven Wechselstromgrößen gleich sind.

Das bisher Besprochene diene nur zur allgemeinen Übersicht der Verhältnisse in Wechselstromkreisen, im nächsten und den nachfolgenden Abschnitten wollen wir untersuchen, in welchem Maße die Leistung und die Phasendifferenzen sich ändern, wenn die Natur der Belastung eine andere wird.

IV. Kapitel.

Wechselstromkreise mit Ohmschem Widerstande und Selbstinduktion.

Fließt ein Gleichstrom durch eine Leitung, dessen Widerstand r Ohm ist, dann wird die Größe der Gleichstromleistung bei der Stromstärke i durch die Wärmemenge gegeben, welche dem Ausdrucke $i^2 r$ proportional ist.

Ein Wechselstrom hat dieselbe Leistung, wenn die effektive Stromstärke gleich mit obiger Gleichstromstärke ist, vorausgesetzt, daß dieser Wechselstrom in solchem Leiter fließt, der nur Ohmschen Widerstand besitzt, d. h. daß die entstehende Wärmemenge nur die sogenannte Drahtwärme ist. Sind im Stromkreise aber auch solche Leiter, die nächst Eisenmassen führen, wie z. B. Elektromagnete, Transformatoren, Drosselspulen etc., dann entstehen in den Eisenmassen infolge induktiver und magnetisierender Wirkungen Ströme, welche die Eisenmassen erwärmen und der Gesamteffekt des Stromes ergibt sich in solchen Fällen nicht nur aus der Drahtwärme, man muß vielmehr noch die anderen entstehenden Energieverluste auch in Betracht ziehen. Solche Verluste sind der Hysteresisverlust im Eisenkern, d. h. die Ummagnetisierungsarbeit und der Foucaultsche Verlust, welcher durch die in dem Eisen und Metallmassen

Digitized by Google

induzierten Strömen entsteht und ebenfalls in Wärme umgesetzt wird. Diesen letzteren nennt man auch Wirbelstromverlust.

Die Natur der Ummagnetisierungsarbeit geht aus folgendem hervor. Wenn man ein zuvor demagnetisiertes Eisenstück der Wirkung fortwährend wachsender magnetisierender Kraft unterwirft, d. h. wenn man z. B. bei einem Elektromagneten die Intensität des magnetisierenden Stromes gleichmäßig verstärkt und die Intensität des entstehenden magnetischen Feldes mißt, dann bemerkt man, daß letztere anfangs sehr rasch zunimmt, später langsamer, so daß über eine gewisse Grenze hinaus unverhältnismäßig starke Ströme nötig sind, um das magnetische Feld nur wenig verstärken zu können. Dieser Vorgang ist in Fig. 32 dargestellt.

Die Abscissenachse OX enthält die Werte der magnetomotorischen Kraft, während auf die Ordinatenachse OY die Kraftlinienzahl, d. h. die Anzahl der auf $1\ cm^2$ senkrecht zur Richtung der Kraftlinien liegenden Fläche fallenden Kraftlinien getragen wird. Diese Kurve ist bei den verschiedenen Eisensorten verschieden, am raschesten steigt sie bei ausgeglühtem Schmiedeeisen, am langsamsten bei Gußeisen. Bei Schmiedeeisen genügt also ein schwächerer magnetisierender Strom, um ein magnetisches Feld von bestimmter Intensität hervorzurufen, als unter sonst gleichen Umständen bei Gußeisen. In Fig. 32 ist I die Magnetisierungskurve für Schmiedeeisen, II diejenige für Gußeisen.

Wenn man den Magnetisierungsstrom oder die magnetomotorische Kraft nur bis zu einer gewissen Grenze anwachsen läßt — diese Grenze ist praktisch dort, wo der Zuwachs der Kraftlinien nur mehr schwach erfolgt — und dann den Strom fortwährend abschwächt, dann fällt auch die Intensität des magnetischen Feldes, doch nicht in

derselben Weise, als sie angewachsen war, sondern die ihr entsprechende Kurve bleibt ober der ersten

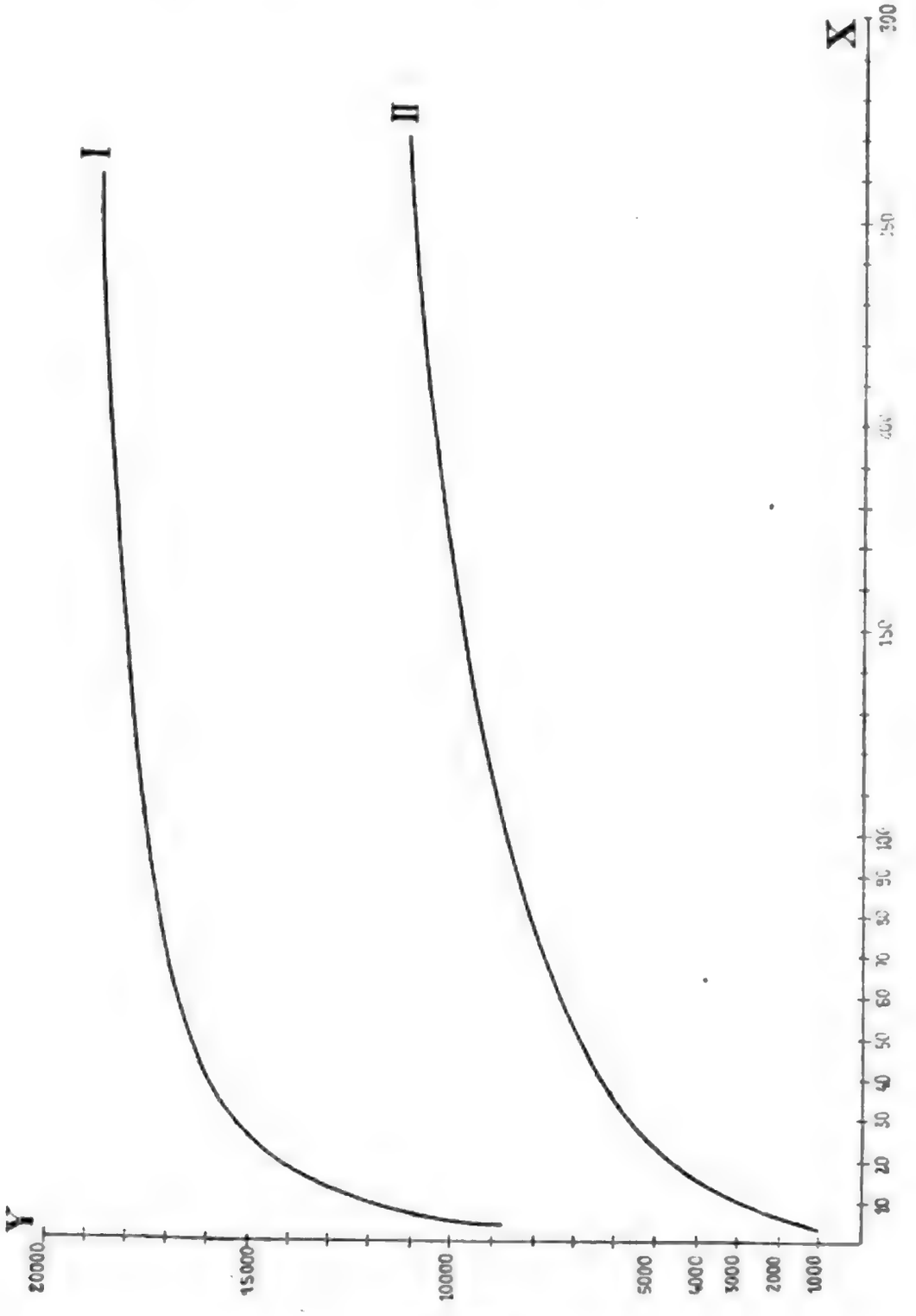


Fig. 32.

Kurve. Wenn der Strom bereits Null wird, verschwinden die Kraftlinien nicht, sondern bilden

Digitized by Google

den sogenannten remanenten Magnetismus. Es muß eine entgegengesetzt wirkende magnetomotorische Kraft angewendet werden, um das magnetische Feld völlig verschwinden zu lassen und die Größe der Kraft, welche dazu nötig war, heißt Coërcitivkraft.

Die Coërcitivkraft ist bei den verschiedenen magnetischen Körpern verschieden groß, bei Schmiedeeisen ist sie am kleinsten, bei glashartem Stahl am größten.

Wird nun der magnetisierende Prozeß weitergeführt im entgegengesetzten Sinne, dann wird die Polarität des Feldes auch entgegengesetzt, d. h. die Kraftlinien ändern ihre Richtung und es entsteht eine der Magnetisierungskurve ähnliche Kurve unter der Abscissenachse. Nach Erreichung der oben angegebenen Grenze die magnetomotorische Kraft wieder abschwächend, kehrt die Kurve ebenso wie früher auf einem anderen Wege zurück, bildet beim Schnittpunkte mit der Ordinatenachse das Maß des negativen remanenten Magnetismus und wird endlich die magnetomotorische Kraft nochmals bis zum positiven Maximum gesteigert, dann schließt sich der letzte Kurventeil beim höchsten Punkte mit der ersten aufsteigenden Kurve.

Durch diese Versuchsanordnung erhält man eine durch Kurven umschlossene Fläche, welche die Hysterisisschleife genannt wird. Die eben beschriebene Erscheinung ist die magnetische Hysteresis. In Fig. 33 sind die Hysteresisschleifen für verschiedene magnetische Materalien dargestellt. Aus diesem ist ersichtlich, daß die Hysteresisschleife um so breiter wird, je größer die Cöercitivkraft ist, oder mit anderen Worten, je magnetisch härter das Material ist.

Warburg hat gezeigt, daß der Flächeninhalt der Hysteresisschleife proportional jener Arbeit

Digitized by Google

ist, welche angewendet werden muß, um das Material ummagnetisieren zu können. Nachdem diese Arbeitsmenge bei jedem vollen magnetischen Kreisprozesse zu leisten ist, kann man leicht ein-

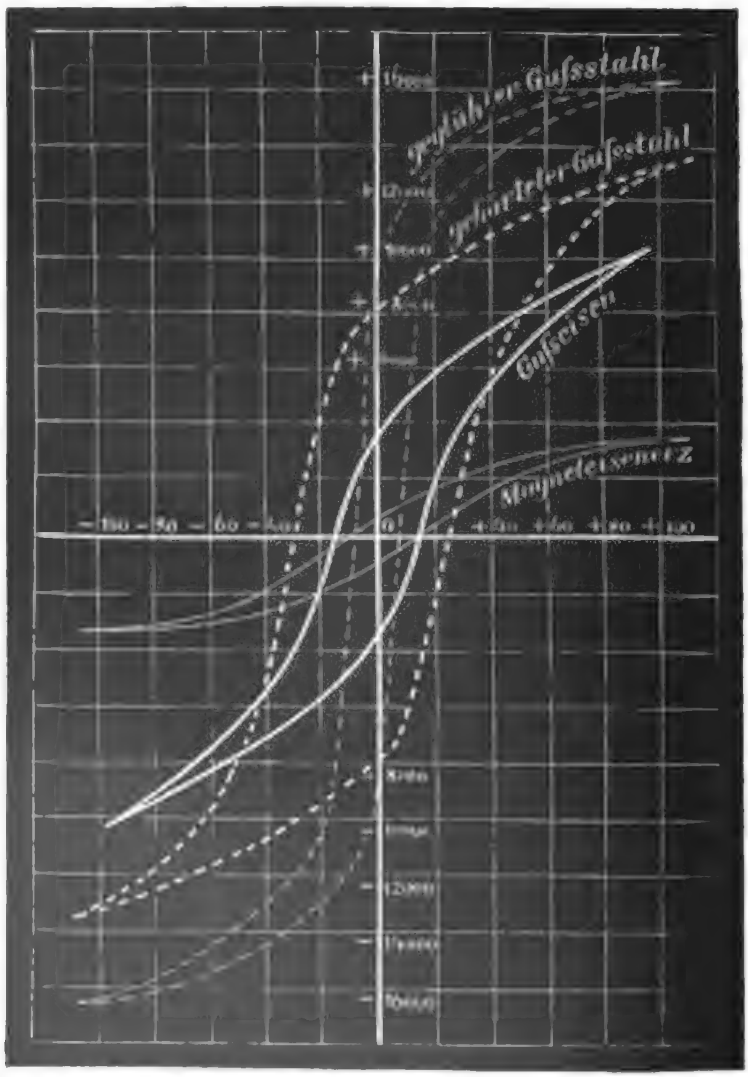


Fig. 33.

sehen, daß die gesamte Hysteresisarbeit bei Wechselströmen eine bedeutende sein muß, da bei diesen einer jeden vollen Periode ein magnetischer Kreisprozeß entspricht und die Periodenanzahl des Wechselstromes gewöhnlich eine große ist. Für

Wechselstromapparate kann man also nur magnetisch weiche Materiale verwenden, bei denen die Hysteresisschleifen schmal sind. Als bestes Material erwies sich weiches, ausgeglühtes Schmiedeeisen, welches in Blech-, Band- oder Drahtform zur Verwendung kommt.

Die Ursache, weshalb bei Wechselstromapparaten und -Maschinen die Eisenkerne aus Blech oder Draht verfertigt werden, liegt darin, daß im Eisenkerne nicht nur Hysteresisverluste auftreten, sondern auch eine andere Erscheinung entsteht, nämlich die, daß im Eisen durch induktive Wirkungen elektrische Wechselströme entstehen, welche sich im Eisenkerne ausgleichen. Wenn aber ein Strom bei gegebener elektromotorischer Kraft durch einen Leiter fließt, wird er um so stärker, je kleiner der Gesamtwiderstand des Leiterkreises ist. Bei den obengenannten Strömen, welche man mit Wirbelströmen oder Foucaultschen Strömen bezeichnet, ist Gelegenheit vorhanden, sich entwickeln zu können, da die Eisenkerne gewöhnlich große Dimensionen besitzen. Diese Wirbelströme verlaufen in einer, auf die Richtung der induzierenden Kraftlinien senkrechten Ebene, wenn man also den Eisenkern parallel zu der Kraftlinienrichtung aufteilt, dann wird der Widerstand des Wirbelstromkreises vergrößert, ohne daß man den magnetischen Widerstand des magnetischen Kreises vergrößern würde und die Wirbelströme können sich nicht stark entwickeln. Wenn aber die Stromstärke klein ist, dann wird die entstehende Wärmemenge auch klein sein, d. h. der Verlust durch Wirbelströme kann durch geeignete Aufteilung des Eisenkernes vermindert werden.

Sowohl die Drahtwärme, als auch die der Hysteresis entsprechende Wärmemenge und der Wirbelstromverlust sind verlorene Energiemengen, da sie durch Ausstrahlung in die umgebende Luft

Digitized by Google

abgegeben werden. Bei Apparaten aber, welche durch Wechselströme durchflossen werden und Selbstinduktion haben, kann man auch eine andere Erscheinung finden, welche keine Energievergeudung bildet, sondern welche beim Entstehen eine gewisse Energie erfordert, dieselbe aber beim Verschwinden wieder der Energiequelle zurückgibt. Diese Erscheinung ist die Entstehung und das Verschwinden des magnetischen Feldes.

Zur Hervorrufung des magnetischen Feldes ist eine gewisse Energiemenge nötig, d. h. um den Äther in den, dem magnetischen Feld entsprechenden Spannungszustand versetzen zu können, benötigen wir die obengenannte Energiemenge. Bei Wechselströmen ändert sich das magnetische Feld infolge Änderung der magnetomotorischen Kraft, oder mit anderen Worten, es verändert sich der Spannungszustand des Äthers nach gewissen Gesetzen, welche von der erregenden Stromstärke abhängen. Dieser Spannungszustand hat ebenso wie der Strom Null-, positive und negative Maximalwerte, seine Änderungen wirken auf den Leiter, um den es entsteht, zurück und wir haben vor uns die Erscheinung der Selbstinduktion.

Die Selbstinduktion hat, wie alle Induktionserscheinungen eine hemmende Wirkung. Der durch sie hervorgerufene Strom heißt Extrastrom, seine Richtung ist, da er immer entgegengesetzt dem induzierenden Strome wirkt, bei Anwachsen des letzteren eine solche, welche dies Anwachsen zu verhindern trachtet, bei abnehmender Stromstärke ist sie dagegen dem induzierenden Strome gleichgerichtet, d. h. sie will das Verschwinden desselben verzögern. Wenn also im ersten Falle eine Arbeit nötig war, um den Strom dem Selbstinduktionswiderstande gegenüber in die Leitung zu senden, so bekommt man im zweiten Falle eine Energiemenge zurück, welche vom Extrastrome

Digitized by Google

herrührt und welche gleich groß jenem Energieaufwande ist, welchen man im ersten Falle mehr benötigte.

Hieraus ist ersichtlich, daß die Selbstinduktion zwar als ein Widerstand sich verhält, jedoch keine Energievergeudung bedeutet. Sie hat aber eine andere Erscheinung zur Folge, nämlich die, daß bei Selbstinduktion der Strom in der Phase der elektromotorischen Kraft gegenüber zurückbleibt, sie verursacht also eine Phasenverschiebung zwischen Strom und elektromotorischer Kraft. Diese Phasenverhältnisse werden wir später eingehender behandeln.

Nachdem die Selbstinduktion einen induktiven Widerstand bildet, ist die Größe dieses Widerstandes durch die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion bestimmt. Der Wert dieser elektromotorischen Kraft hängt von der Anzahl der verschwindenden Kraftlinien, also von der Stärke des Erregerstromes, von der Geschwindigkeit, mit welcher die Kraftlinien verschwinden und von einem Koeffizienten ab, dessen Größe von der Gestalt des Leiters, von der Anzahl der Windungen und von den magnetischen Eigenschaften des Eisenkernes bedingt wird. Nennen wir die Erregerstromstärke J, die Geschwindigkeit, mit welcher die Kraftlinien sich ändern, ω und den genannten Koeffizienten L, dann ist die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion E_s:

$$E_s = J\,\omega\,L.$$

L ist der sogenannte Selbstinduktionskoeffizient des Leiters. Solange zwischen der Erregerstromstärke und der Anzahl der erzeugten Kraftlinien eine einfache Proportionalität besteht, ist L konstant. Wenn zur Erzeugung von N Kraftlinien die Stromstärke i nötig war, dann wird die Stromstärke Eins die Kraftlinien L erzeugen, d. h.

$$\frac{N}{i} = \frac{L}{1}$$

und hieraus

$$N = L\,i$$

was soviel sagt, daß der Selbstinduktionskoeffizient eines Leiters gleich der Zahl jener Kraftlinien ist, welche durch die Einheit der diesen Leiter durchfließenden Stromstärke induziert wird.

Im Ausdrucke der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion ist ω nichts anderes als die Winkelgeschwindigkeit des Stromvektors, da die Periodenzahl des magnetischen Feldes gleich jener der Stromstärke ist. Wenn also zu einer vollen Periode, d. h. zu einer vollen Umdrehung des Vektors die Zeit T nötig ist, dann wird die Winkelgeschwindigkeit durch

$$\omega = \frac{2\,\pi}{T}$$

gegeben, oder nachdem in einer Sekunde ∞ Perioden vollbracht werden, ist die Dauer einer Periode

$$T = \frac{1}{\infty}$$

und demzufolge

$$\omega = 2\,\pi\,\infty.$$

Somit kann E_s auch folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$E_s = J\,.\,2\,\pi\,\infty\,.\,L = J\,\frac{2\,\pi}{T}\,L.$$

Um nun untersuchen zu können, inwiefern das Ohmsche Gesetz Giltigkeit für Stromkreise hat, die Ohmschen Widerstand und Selbstinduktion besitzen, müssen wir uns mit den Phasenverhältnissen vertraut machen.

Digitized by Google

Sei in Fig. 34 OA die Lage des Vektors der Stromstärke in einem gegebenen Zeitpunkt. Wenn der Strom verschwindet, verschwindet auch das magnetische Feld, ist der Strom maximal, dann wird die Feldintensität auch maximal sein, d. h. die Stromstärke und das magnetische Feld sind miteinander in Phase, oder was dasselbe bedeutet, die Vektore der Stromstärke und des magnetischen Feldes fallen in dieselbe Gerade, sie haben dieselbe Richtung. Wenn also $OA = J$ der Stromvektor ist, dann wird z. B. $OB = N$ der Vektor des magnetischen Feldes sein.

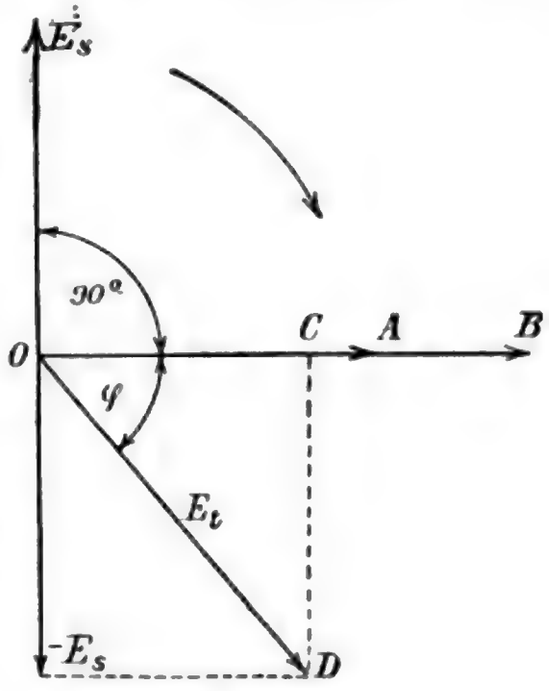


Fig. 34.

Fließt ein Strom durch einen Leiter, dessen Ohmscher Widerstand R beträgt, dann entsteht ein Spannungsverlust, dessen Größe durch $JR = E_n$ gegeben ist. Nachdem R konstant und nur J veränderlich ist, folgt, daß dieser Spannungsverlust sich gerade so ändert wie die Stromstärke, d. h. dieser wird auch eine Wechselgröße sein, die ihre Null- und Maximalpunkte hat und durch einen Vektor dargestellt werden kann.

Welche ist die relative Lage dieses Vektors in unserem Falle? E_n ist das Produkt des Widerstandes in die Stromstärke und da R konstant, wird E_n Null, wenn J Null, und maximal, wenn J maximal. Das sagt soviel, daß E_n und J miteinander in Phase sind, oder daß ihre Vektoren zusammenfallen. Sei der Maximalwert von E_n gegeben, dann wird $OC = E_n$.

Anders verhält es sich mit der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion. Aus den vorher-

Digitized by Google

gehenden Kapiteln wissen wir, daß die induzierte elektromotorische Kraft am größten, wenn die Änderung der Kraftlinienzahl in der Zeiteinheit am größten. Die relativ größte Änderung in der Zahl der Kraftlinien tritt aber dann ein, wenn die Kraftlinien verschwinden oder entstehen, denn in diesen Fällen wird aus einem endlichen Wert ein unendlich kleiner und umgekehrt, demzufolge in diesen Fällen eine maximale elektromotorische Kraft induziert wird. Wenn also die Zahl der Kraftlinien $N = \emptyset$, dann ist die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion $E_s = \max$, und wenn $N = \max$, dann wird $E_s = \emptyset$.

Durch Vektoren dargestellt, bedeutet dies soviel, daß die Vektoren von N und E_s aufeinander senkrecht stehen, d. h. in der Phase einen Unterschied von 90° haben. Es ist nur noch zu entscheiden, ob die elektromotorische Kraft zum magnetischen Felde phasenverspätet oder — verfrüht ist.

Um dies bestimmen zu können, untersuchen wir den Zusammenhang zwischen beiden Wechselgrößen. Induktion kann nur dann stattfinden, wenn eine induzierende Ursache, z. B. Strom oder magnetisches Feld oder eine Bewegung vorhanden ist. In unserem Falle ist das Vorhandensein der induktiven Wirkung den Kraftlinien zuzuschreiben, die Kraftlinien bilden also die Ursache der Induktionserscheinung. Erst müssen die Kraftlinien entstehen oder verschwinden, damit die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion entstehen kann, folglich muß letztere dem magnetischen Felde in Phase nachstehen, oder wir können sagen:

Der Vektor der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion bleibt in der Phase hinter dem Vektor des magnetischen Feldes um 90° oder eine Viertelperiode zurück, oder nachdem der Strom mit dem ma-

Digitized by Google

gnetischen Felde in gleicher Phase ist, eilt der Strom der elektromotorischen Kraft in der Phase um eine Viertelperiode voraus.

In Fig. 34 wird demnach E_s die Lage des Vektors der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion darstellen.

Wenn nun ein Stromkreis Ohmschen Widerstand und Selbstinduktion besitzt, und wollen wir, daß in diesem Stromkreise ein Strom von gegebener Stärke fließe, dann müssen wir eine elektromotorische Kraft wirken lassen, welche nicht nur den Ohmschen Spannungsverlust, sondern auch die Gegenkraft der Selbstinduktion bewältigen kann. Die gesamte elektromotorische Kraft setzt sich also aus zwei Teilen zusammen, nämlich aus einem, welcher dem Ohmschen Spannungsverlust gleich ist, und einem, welcher die Gegenkraft der Selbstinduktion kompensiert.

Immerhin dürfen diese beiden Teile nicht algebraisch summiert werden, denn wir würden dann zu falschen Resultaten gelangen, da diese Teile zwar von gleicher Periode, jedoch in der Phase nicht übereinstimmend sind. Wie aus der Figur ersichtlich, sind die Komponentspannungen: $OC = -E_n$ und die kompensierende Spannung $-E_s$. Diese bilden miteinander im Vektordiagramm einen Phasenwinkel von 90°, weshalb ihre Resultante $OD = E_t$ durch jene Diagonale gegeben ist, welche durch den gemeinsamen Schnittpunkt O hindurchgeht.

Nun haben wir die resultierende elektromotorische Kraft E_t durch ihren Vektor OD erhalten, und ersehen zugleich aus der Figur, daß diese elektromotorische Gesamtkraft in der Phase dem Strome voreilt. Der Phasenverschiebungswinkel ist φ.

Betrachten wir die Figur, so sehen wir, daß bei gleichem Ohmschen Widerstande φ um so

Digitized by Google

größer wird, je größer $-E_s$, d. h. je größer die Selbstinduktion. Will man daher in einem Wechselstromkreise erreichen, daß die elektromotorische Kraft und die Stromstärke in Phase bleiben, dann darf keine Selbstinduktion vorhanden sein. Solche induktionslose Belastungen sind die Glühlampen. Es gibt aber Methoden, welche erreichen lassen, daß bei gegebener induktiver Belastung die Phasenverschiebung auf Null herabgedrückt wird, mit diesen werden wir uns später befassen.

Sehen wir nun, wie sich die elektromotorische Gesamtkraft mit den Komponentspannungen ausdrücken läßt.

Aus dem rechtwinkeligen Dreieck $O\,C\,D$ kann die gesuchte Größe als die Diagonale folgendermaßen bestimmt werden.

$$\overline{O\,D^2} = \overline{O\,C^2} + \overline{C\,D^2}$$

oder

$$E_l^2 = E_n^2 + (-E_s)^2 = E_n^2 + E_s^2.$$

Die entsprechenden Werte substituiert, wird

$$E_l^2 = J^2\,R^2 + L^2\,\omega^2\,J^2$$

und hieraus

$$E_l = J\sqrt{R^2 + L^2\,\omega^2}.$$

Die Stromstärke wird bei gegebener elektromotorischer Kraft

$$J = \frac{E_l}{\sqrt{R^2 + L^2\,\omega^2}}$$

sein.

Dies ist der Ausdruck für das Ohmsche Gesetz in Wechselstromkreisen, welche außer dem Ohmschen Widerstande auch induktiven Widerstand haben. Der letztere kommt im Nenner zur Geltung, es verringert also bei gegebener elektromotorischer Kraft die Stromstärke. Wenn im Stromkreise nur

Digitized by Google

Glühlampen oder solche Apparate sind, welche keine Selbstinduktion besitzen, bei denen also $L = O$ ist, dann nimmt die letzte Gleichung die einfachere Form an:

$$J = \frac{E_t}{\sqrt{R^2}} = \frac{E_t}{R}$$

d. h. in diesem Falle ist Ohms Gesetz ebenso ohne jede Änderung giltig, wie in jedem Gleichstromkreise.

Aus der vorletzten Gleichung ist ersichtlich, daß der induktive Widerstand nicht nur von dem Selbstinduktionskoeffizienten, sondern auch von der Winkelgeschwindigkeit abhängt. Nachdem aber letztere eine Funktion der Periodenzahl ist, kann man sagen, daß die Stromstärke bei gegebener elektromotorischer Kraft und Selbstinduktionskoeffizienten um so kleiner ist, je größer die Periodenzahl des Wechselstromes wird.

Den Ausdruck

$$\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

nennt man die Impedanz des Wechselstromes. Ihre Größe ergibt sich aus dem vorhandenen Ohmschen Widerstande und der Selbstinduktionswirkung und sie verhält sich so als ein Widerstand.

Die Impedanz, was ihre Größe betrifft, kann nach obigem Ausdrucke als die Diagonale eines rechtwinkeligen Dreieckes aufgefaßt werden, dessen eine Kathete der Ohmsche Widerstand, die andere Kathete der induktive Widerstand ist. Den letzteren, da er eigentlich eine Induktionswirkung ist, nennt man Induktanz.

Will man daher bei gegebenem Ohmschen Widerstande und gegebener Induktanz den resultierenden Widerstand, die Impedanz des Stromkreises ermitteln, dann verfährt man graphisch in der Weise, daß man zwei aufeinander senkrechte

Digitized by Google

Linien zieht, auf diese den Wert von R und $L\omega$ aufträgt und die Endpunkte miteinander verbindet (Fig. 35). Die Länge dieser Verbindungslinie AB ist das Maß für die Größe der gesuchten Impedanz. Der Winkel $\sphericalangle ABO = \varphi$ ist nichts anderes als der Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und elektromotorischer Kraft, wie dies auch aus Fig. 34 hervorgeht, in welcher das Dreieck COD dem Dreiecke AOB in Fig. 35 kongruent ist, da die Seiten der Dreiecke voneinander nur um einen konstanten Faktor, der Stromstärke, verschieden sind.

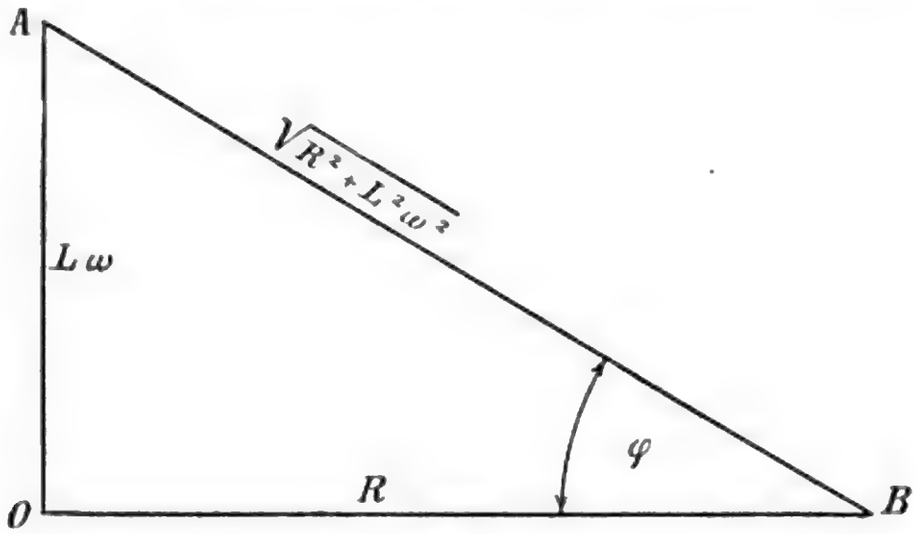


Fig. 35.

Beispiel zur Berechnung der Impedanz eines Wechselstromkreises.

In einem Wechselstromkreise sei der gesamte Ohmsche Widerstand $R = 10$ Ohm. Die Periodenzahl des Wechselstromes ist 50.

Um die Induktanz bestimmen zu können, müssen wir auch die Größe des Selbstinduktionskoeffizienten kennen. Der Ausdruck des letzteren ist, wie wir bereits auf Seite 92 sahen,

$$L = \frac{N}{i}$$

wo N die Gesamtzahl der Kraftlinien, i die diese

Digitized by Google

Kraftlinien hervorrufende Stromstärke ist. Wollen wir die Dimension von L haben, so müssen wir die Dimensionen von N und i substituieren. Der Dimensionsausdruck wird daher folgendermaßen lauten:

$$Dim\, L = \frac{Dim\, N}{Dim\, i} = \frac{C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}}{C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}} = C$$

d. h. die Dimension des Selbstinduktionskoeffizienten ist eine Länge, und zwar im absoluten Maßsystem das Zentimeter.

Will man L im praktischen Maßsystem ausdrücken, so muß man für N und i die Dimensionen im praktischen Maßsystem substituieren. Nachdem die Einheit des magnetischen Feldes gleich 10^8 absolute Einheiten und jene der Stromstärke 10^{-1} absoluten Einheiten gleich ist, wird die Dimension des Selbstinduktionskoeffizienten die Vergleichszahl 10^9 erhalten, da $\frac{10^8}{10^{-1}} = 10^9$ ist.

10^9 *cm* = 10.000 *km* ist annähernd die Länge des Erdquadranten, weshalb man diese praktische Einheit von L Erdquadranten oder nach den Beschlüssen des Chicagoer Elektrotechniker-Kongresses Henry nennt.

Auf unser Beispiel zurückkehrend, sei der Selbstinduktionskoeffizient des Stromkreises $L = 0{,}2$ Henry. Aufgabe ist, die Impedanz des Stromkreises zu ermitteln.

In erster Reihe müssen wir $L\omega$ kennen. ω ist die Winkelgeschwindigkeit, daher

$$\omega = 2\pi\infty = 2\pi 50 = 314$$

also wird

$$L\omega = 0{,}2 \cdot 314 = 62{,}8$$

und die Impedanz:

$$\sqrt{R^2 + L^2\omega^2} = \sqrt{10^2 + 62{,}8^2} = \sqrt{4043{,}84} = 63{,}58.$$

302754

Digitized by Google

Eine weitere Aufgabe besteht darin, die Stromstärke zu bestimmen, wenn im obigen Stromkreise die konstante elektromotorische Kraft $e_{eff} = 100$ Volt wirkt.

Die für die Stromstärke abgeleitete Formel hat nicht nur auf die Maximalwerte, sondern auch auf Effektivwerte Giltigkeit, denn es war:

$$J_{max} = \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}.$$

Mit $\sqrt{2}$ beide Seiten der Gleichung dividiert, wird

$$\frac{J_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

oder

$$i_{eff} = \frac{e_{eff}}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}.$$

In dem Beispiel wird demnach die Größe der effektiven Stromstärke

$$i_{eff} = \frac{100}{63{,}58} = 1{,}57 \text{ Ampère}$$

sein.

Bestimmung der Impedanz zweier miteinander in Serie geschalteter Widerstände mit Selbstinduktion.

Die Schaltungsweise ist in Fig. 36 dargestellt. W ist die Wechselstromquelle, welche einen Wechselstrom von der Spannung e_t und der Periodenzahl $\sim$ liefert. Die zwei in Serie geschalteten Widerstände und Selbstinduktionen sind I und II, und zwar sind die Ohmschen Widerstände r_1 und r_2, die Selbstinduktionskoeffizienten l_1 und l_2. Die Potentialdifferenz an den Endpunkten

Digitized by Google

von I sei e_1, jene zwischen den Endpunkten von II e_2. Die Widerstände der Zuleitungen seien so klein, daß man sie vernachlässigen kann.

Schließt man den Stromkreis, dann fließt ein Strom von der Stärke i_t durch die Leitung, seine Größe wird durch die Impedanz des ganzen Stromkreises bestimmt. Nachdem die Leiter in Serie geschaltet sind, fließt in jedem Teile des Stromkreises dieselbe Stromstärke.

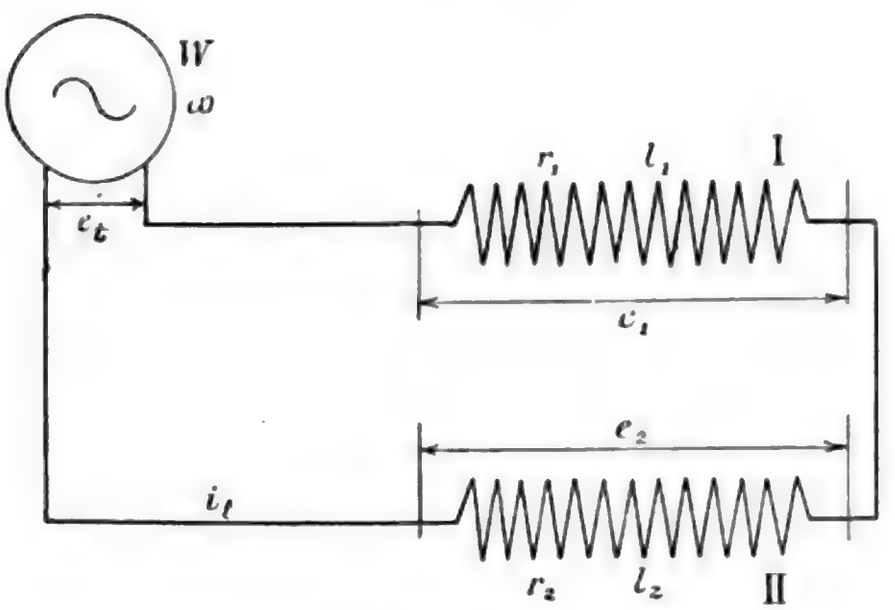


Fig. 36.

Für die Spannung gilt nicht dieser einfache Zusammenhang, d. h. die Gesamtspannung e_t ist nicht die algebraische Summe von e_1 und e_2, vielmehr ist sie eine Resultante dieser beiden Spannungen.

Die graphische Behandlung dieses Problems ist in Fig. 37 dargestellt. Sowohl die Spannungsdifferenz e_1 als auch e_2 sind resultierende Größen von zwei Komponentspannungen. Eine Komponente ist der Ohmsche Spannungsverlust durch die Widerstände r_1 und r_2, die Zweite ergibt sich aus den induktiven Widerständen.

Wenn der Strom i_t durch den Widerstand r_1 fließt, dann wird der Spannungsabfall $i_t r_1$ sein.

Digitized by Google

Ebenso wird der Wert der zweiten Komponente durch $i_t l_1 \omega$ gegeben. Wir wissen, daß diese Komponenten senkrecht aufeinander stehen, folglich muß e_1 als dritte Seite des Vektorpolygons die resultierende Spannung sein. Hiermit ist der Vektor e_1 sowohl seine Lage als auch seine Größe betreffend völlig bestimmt.

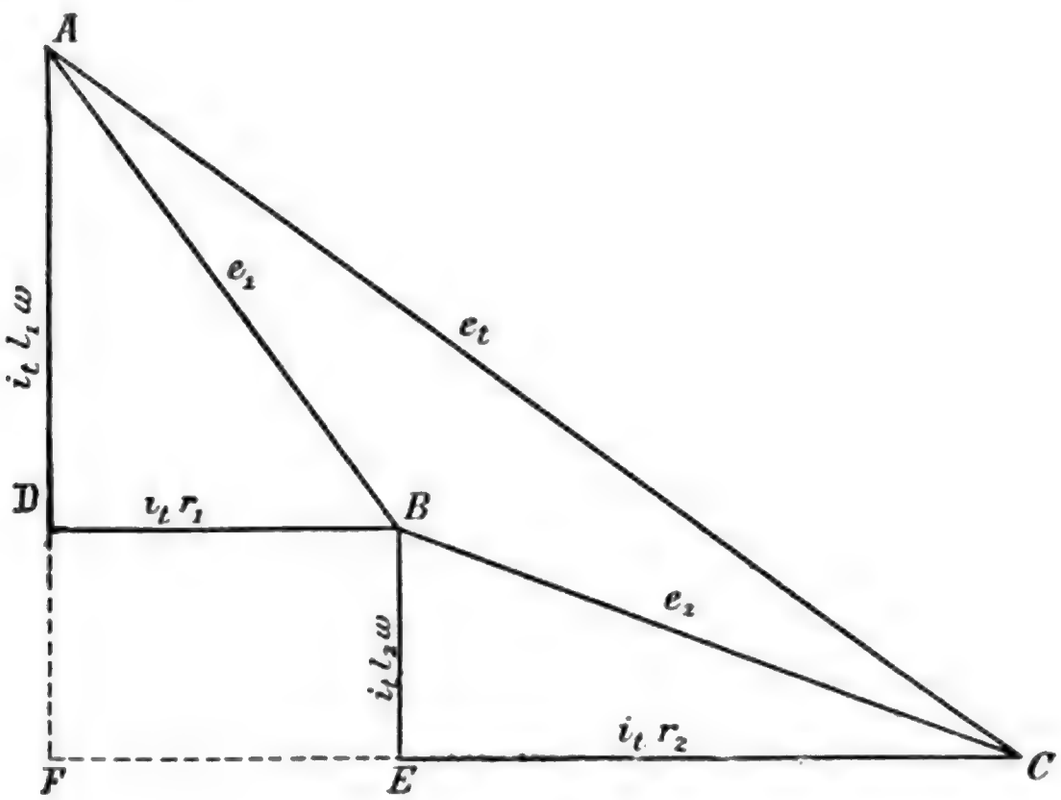


Fig. 37.

Was für den Widerstand I steht, dasselbe ist auch für II giltig, und ergibt sich e_2 als Resultante von $i_t r_2$ und $i_t l_2 \omega$.

Nachdem nun e_1 und e_2 durch Vektoren gegeben sind, bestimmt man e_t die totale elektromotorische Kraft durch ihren Vektor dadurch, daß man die Punkte A und C miteinander verbindet.

Aus diesen Erörterungen ist ersichtlich, daß im allgemeinen die Potentialdifferenzen bei in Serie geschalteten Widerständen und Selbstinduktionen nicht algebraisch summiert werden dürfen. Eine solche Summation ist nur dann zulässig und führt

Digitized by Google

zu richtigen Ergebnissen, wenn die Vektoren e_1 und e_2 in eine Linie fallen, denn in diesem Falle muß notwendigerweise e_t auch in dieser Linie liegen, da der Flächeninhalt des Dreieckes ABC zu Null wird.

Aus letzterem geht zugleich hervor, daß eine algebraische Summation von Vektorgrößen nur dann zu richtigen Ergebnissen führt, wenn die Phasendifferenz zwischen den Komponentvektoren Null oder 180° beträgt. In allen anderen Fällen ist nur die geometrische Summation am Platze.

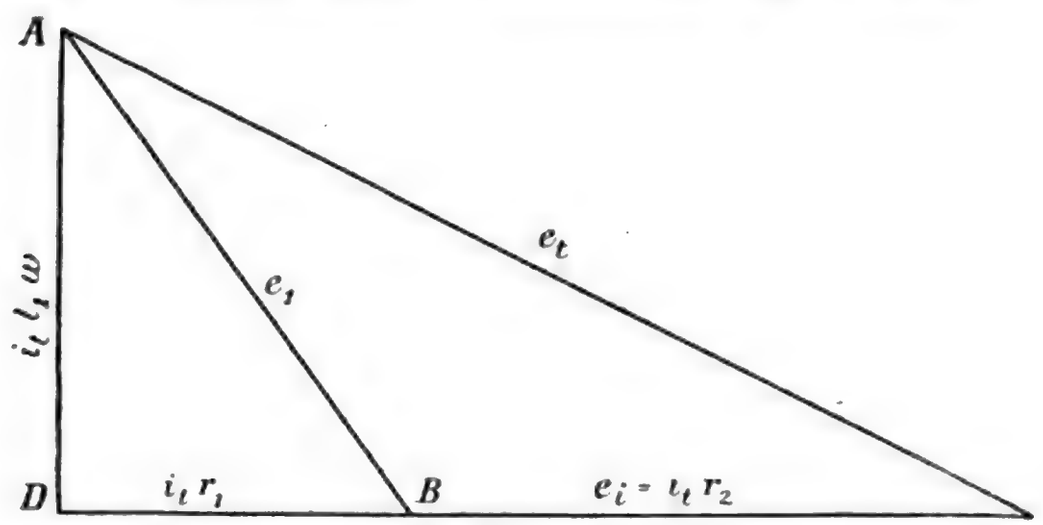


Fig. 38.

Würde die Belastung II nur Ohmschen Widerstand haben, dann wäre $l_2 = o$ und die Seite $BE = \emptyset$. e_2 wird in diesem Falle mit dem Ohmschen Spannungsverlust gleich sein, und das Vektordiagramm nimmt die in Fig. 38 angedeutete Form an. Dieser Fall ist übrigens nichts anderes, als eine solche Belastung, welche den Selbstinduktionskoeffizienten l_1 und den Widerstand $r = r_1 + r_2$ hat. Das Vektordiagramm dieser Belastung ist dann ADC.

Unsere Aufgabe ist, die Impedanz des in Fig. 36 dargestellten Stromkreises zu bestimmen.

Wenn man in Fig. 37 das Dreieck AFC betrachtet, dann sieht man, daß dies ein Vektor-

Digitized by Google

polygon für e_t mit den Seiten $i_t l_1 \omega + i_t l_2 \omega$ und $i_t r_1 + i_t r_2$ ist. Das für solchen Wechselstromkreis abgeleitete Ohmsche Gesetz aufstellend, bekommen wir folgenden Ausdruck:

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + \omega^2 (l_1 + l_2)^2}}.$$

Die Impedanz für I und II sind:

$$x_I = \sqrt{r_1^2 + l_1^2 \omega^2}; \quad x_{II} = \sqrt{r_2^2 + l_2^2 \omega^2}.$$

Die gesuchte Gesamtimpedanz aber:

$$x = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + \omega^2 (l_1 + l_2)^2}.$$

Ganz allgemein, wenn n Spulen mit den Ohmschen Widerständen $r_1, r_2, \ldots r_n$ und den Selbstinduktionskoeffizienten $l_1, l_2, \ldots l_n$ in einem Wechselstromkreise in Serie geschaltet sind und die Winkelgeschwindigkeit für die Vektoren dieses Wechselstromes ω ist, dann wird die Impedanz des ganzen Stromkreises:

$$x = \sqrt{(r_1 + r_2 + \ldots + r_n)^2 + \omega^2 (l_1 + l_2 + \ldots + l_n)^2}.$$

Wenn die Stromquelle die elektromotorische Kraft e_t besitzt, dann wird die entstehende Stromstärke i_t:

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{(r_1 + r_2 + \ldots + r_n)^2 + \omega^2 (l_1 + l_2 + \ldots + l_n)^2}}$$

sein.

Die Größe des Phasenverschiebungswinkels zwischen e_t und i_t kann durch den Cosinus des Dreieckes $A\,O\,B$ (Fig. 35) bestimmt werden, und zwar:

$$\cos \varphi = \frac{O\,B}{A\,B} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

Digitized by Google

mit i_t multipliziert und dividiert:

$$\cos\varphi = \frac{i_t R}{i_t \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}} = \frac{E_n}{E_t}.$$

Impedanz zweier parallelgeschalteter Widerstände und Selbstinduktionen.

In Fig. 39 sind I und II zwei Belastungen, welche Ohmschen und induktiven Widerstand besitzen, also z. B. zwei, mit vielen Windungen und je einem Eisenkerne versehene Spulen. Die Ohmschen Widerstände sind r_1 und r_2, die Selbstinduktionskoeffizienten l_1 und l_2. Die Wechselstromquelle W liefert einen Strom, dessen Periodenzahl bekannt und dessen Spannung e_t gegeben ist. ω die Winkelgeschwindigkeit des Vektors im Vektordiagramm kann aus der Periodenzahl nach schon früher beschriebener Weise berechnet werden.

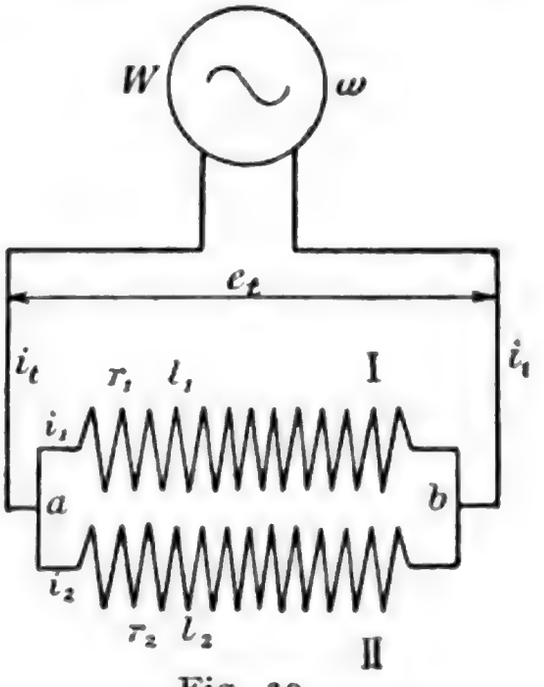


Fig. 39.

Nachdem die Spulen parallel geschaltet sind, ist die Potentialdifferenz zwischen ihren Endpunkten gleich, und zwar e_t.

Anders verhält es sich mit der Stromstärke. Während bei der Serienschaltung in Fig. 36 die Stromstärke im ganzen Stromkreise konstant war, ist dies hier nicht der Fall, denn der in der Hauptleitung fließende Strom i_t, dessen Richtung in einem Zeitpunkte in der Figur durch einen Pfeil angedeutet ist, teilt sich bei a in die Teilströme i_1 und

Digitized by Google

i_2, welche dann bei b sich wieder vereinigen und den Strom i_t ergeben.

Analog dem Falle bei der Serienschaltung, bei welcher die Spannungswerte nicht ohne weiteres algebraisch summiert werden durften, sondern eine geometrische Addition vorgenommen werden mußte, um die resultierende Spannung erhalten zu können, müssen auch im jetzigen Falle die Vektoren der Stromstärken i_1 und i_2 auf Größe und Lage bestimmt werden, um aus ihnen dann die in der ungeteilten Leitung fließende Stromstärke ermitteln zu können.

Zu diesem Behufe bildet man das schon öfters behandelte rechtwinkelige Dreieck, welches zwischen dem Ohmschen, dem induktiven Spannungsverlust und der Gesamtspannung den Zusammenhang ergibt. Nachdem wir wissen, daß die Stromstärke und der Ohmsche Spannungsverlust zusammenfallende Vektoren haben, d. h. daß sie gleichphasig sind, bekommen wir die Stromvektoren auf Lage und Größe richtig, wenn wir die Stromstärken auf die Vektoren der Ohmschen Spannungsverluste auftragen. Aus diesen läßt sich dann die resultierende Stromstärke konstruieren und berechnen.

Wie schon bekannt, ist bei den Spannungszerlegungen in Ohmsche und induktive Spannungsverluste ein rechtwinkeliges Dreieck zu konstruieren, dessen zwei Katheten der induktive und der Ohmsche Spannungsabfall sind, die Diagonale dagegen die Gesamtspannung ist.

Bei parallel geschalteten Ohmschen und induktiven Widerständen ist die Spannungsdifferenz zwischen den Endpunkten $a\,b$ dieselbe und zwar e_t, folglich ist die Diagonale des Vektordiagrammes für beide Spulen dieselbe. Die Katheten werden dagegen verschiedene sein, denn sowohl r_1 und r_2, als auch l_1 und l_2 sind verschieden.

Unsere Aufgabe besteht nun darin, über einer Diagonale e_t zwei solche rechtwinkelige Dreiecke

Digitized by Google

zu konstruieren, deren eine Kathete $i_1 r_1$, beziehungsweise $i_2 r_2$ ist, die andere dagegen dem induktiven Spannungsabfall $i_1 l_1 \omega$, beziehungsweise $i_2 l_2 \omega$ entspricht.

Dieses geometrische Problem löst man in bekannter Weise dadurch, daß man die Diagonale e_t halbiert und mit $\frac{e_t}{2}$ als Halbmesser einen Halbkreis beschreibt (Fig. 40). Alle aus den Punkten dieses Halbkreises zu den Endpunkten von e_t führende Geraden bilden die zwei Katheten eines rechtwinkeligen Dreieckes, dessen Diagonale e_t ist und bei denen der rechte Winkel an dem Kreise liegt.

Die verschiedenen Spannungsverluste berechnet, gelangen wir zu folgenden Ergebnissen:

Der Ohmsche Spannungsverlust im Ohmschen Widerstande ist in der Spule I gleich $i_1 r_1$. Mit dem dieser Größe entsprechenden Vektor fällt der Vektor der Stromstärke i_1 zusammen. Nachdem bei induktiven Belastungen die Stromstärke in der Phase der Spannung zurückbleibt, muß bei der in der Fig. 40 angegebenen Drehrichtung der Vektor des Ohmschen Spannungsabfalles, also auch der der Stromstärke aus dem Punke A ausgehen und oberhalb der Linie e_t liegen.

Für die Spannungen und die Stromstärken wählen wir geeignete Maßstabe und tragen nun den Ohmschen Spannungsabfall $i_1 r_1$ im Diagramm in der Weise auf, daß man mit der ihm im Spannungsmaßstabe entsprechenden Länge den Halbkreis von A aus schneidet. Hierdurch bekommen wir den Punkt B, so daß

$$\overline{AB} = i_1 r_1.$$

Nach den bisherigen Erörterungen folgt, daß die zweite Kathete des Dreieckes ABC nichts

Digitized by Google

anderes sein kann, als der induktive Spannungsabfall, d. h.

$$\overline{BC} = i_1 l_1 \omega.$$

Somit sind die Spannungsverhältnisse für die Spule I bestimmt.

Für die Spule II verfährt man in derselben Weise, es wird also

$$\overline{AD} = i_2 r_2 \quad \text{und} \quad \overline{DC} = i_2 l_2 \omega.$$

Die zwei Dreiecke ABC und ADC sind voneinander verschieden, da die Spulen verschieden große Ohmsche Widerstände und Selbstinduktionskoeffizienten besitzen.

Aus beiden Dreiecken folgt, daß

$$e_t = i_1 \sqrt{r_1^2 + l_1^2 \omega^2}$$

und

$$e_t = i_2 \sqrt{r_2^2 + l_2^2 \omega^2}$$

oder

$$i_1 \sqrt{r_1^2 + l_1^2 \omega^2} = i_2 \sqrt{r_2^2 + l_2^2 \omega^2}$$

woraus

$$i_1 : i_2 = \sqrt{r_2^2 + l_2^2 \omega^2} : \sqrt{r_1^2 + l_1^2 \omega^2}$$

d. h. bei zwei parallel geschalteten Widerständen mit Selbstinduktionen verhalten sich die Teilstromstärken so, wie die Impedanzen umgekehrt.

Aus $i_1 r_1$ und $i_2 r_2$ können i_1 und i_2 berechnet werden, wenn man die Widerstände r_1 und r_2 kennt. Diese Ströme sind mit obigen Ohmschen Spannungsverlusten in gleicher Phase, ihre Vektoren liegen also zusammen. Mißt man also die berechneten Werte von i_1 und i_2 in dem Stromstärke-Maßstabe und trägt die so erhaltenen Längen auf $\overline{AB}$, beziehungsweise $\overline{AD}$ auf, dann bekommt man die Punkte E und F, und zwar ist:

$$\overline{AE} = i_1 \quad \text{und} \quad \overline{AF} = i_2.$$

Digitized by Google

Die Drehrichtung ist angegeben, es sind somit die Phasenverspätungswinkel zwischen e_t und den Stromstärken φ_1, beziehungsweise φ_2. Ihre Größen sind aus beiden Dreiecken bestimmt, und zwar wird:

$$\cos\varphi_1 = \frac{AB}{AC} = \frac{i_1 r_1}{e_t}\,;\quad \cos\varphi_2 = \frac{AD}{AC} = \frac{i_2 r_2}{e_t}.$$

Die im ungeteilten Kreis fließende Stromstärke ist die Resultante der beiden Ströme i_1 und i_2. Sie wird in der Weise aus i_1 und i_2 konstruiert, wie die resultierende Kraft aus den Komponentkräften, und es wird in unserem Falle

$$\overline{AG} = i_t.$$

Der Vektor der resultierenden Stromstärke schneidet den Halbkreis im Punkte H, welcher einen Ohmschen Spannungsabfall bestimmt. AH ist der Spannungsabfall in einer solchen Spule, welche bezüglich der Ohmschen Widerstände den Spulen I und II gleichwertig ist und durch welche der Gesamtstrom i_t fließend der Ohmsche Spannungsabfall mit AH gleich ist. Analog ist HC ein Maß für den induktiven Spannungsabfall der genannten Spule. Soll die Spule mit I und II gleichwertig sein, dann muß auch der induktive Spannungsabfall bei dem Strome i_t mit HC proportional werden. Für diese Spule bestehen daher die Beziehungen, daß

$$\overline{AH} = i_t r \quad \text{und} \quad \overline{HC} = i_t l\,\omega$$

wenn r den resultierenden Widerstand und l den resultierenden Koeffizienten der Selbstinduktion bedeuten.

Der Strom in der ungeteilten Leitung ist auch phasenverspätet und zwar ist der Phasenverschiebungswinkel φ. Die Größe derselben kann aus AHC bestimmt werden, da

$$\cos\varphi = \frac{AH}{AC} = \frac{i_t r}{e_t}$$

ist.

Beispiele.

I. Die Impedanz eines Wechselstromkreises ist zu bestimmen, wenn zwei Ohmsche Widerstände mit Selbstinduktionen in Serie geschaltet sind.

Die Ohmschen Widerstände sind: $r_1 = 10\,\Omega$; $r_2 = 20\,\Omega$. Die Selbstinduktionskoeffizienten $l_1 = 0{,}2$ Henry; $l_2 = 0{,}4$ Henry. Die Periodenzahl ist gegeben, und zwar soll $\infty = 50$ sein.

In erster Linie müssen wir ω kennen. Wie bekannt, ist

$$\omega = 2\pi\infty = 2\pi 50 = 314.$$

Nach der auf Seite 104 abgeleiteten Formel ist die Impedanz dieses Stromkreises:

$$x = \sqrt{(10+20)^2 + 314^2(0{,}2+0{,}4)^2} = \sqrt{30^2 + 314^2 . 0{,}6^2}$$

$$x = 190{,}6.$$

Wie groß wird die Stromstärke in diesem Stromkreise sein, wenn die konstante Spannung $e_t = 100$ Volt beträgt?

Nach Seite 104 wird:

$$i_t = \frac{100}{\sqrt{(10+20)^2 + 314^2(0{,}2+0{,}4)^2}} = \frac{100}{190{,}6}$$

$$i_t = 0{,}525 \text{ Ampère.}$$

Haben wir in diesem Stromkreise 1,5 Ampère nötig, welche elektromotorische Kraft muß dann zur Wirkung kommen?

Digitized by Google

Jetzt wird also $i_t = 1{,}5$ Ampère, die Impedanz $x = 190{,}6$, folglich die wirkende elektromotorische Kraft e_t:

$$e_t = x \,.\, i_t = 190{,}6 \,.\, 1{,}5 = 286 \text{ Volt.}$$

Der Wert der Impedanz hängt außer dem Koeffizienten der Selbstinduktion auch von der Periodenzahl ab. Man könnte auch mit Hilfe dieser Formeln jene Periodenzahl bestimmen, welche die Stromquelle besitzen müßte, um bei gegebener elektromotorischer Kraft eine verlangte Stromstärke liefern zu können.

Wie groß ist die Phasenverschiebung zwischen der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft, wenn die letztere 100 Volt beträgt?

Nach Seite 105 ist der Cosinus der Phasenverspätung zwischen Strom und Spannung:

$$\cos \varphi = \frac{E_n}{E_t} = \frac{e_n}{e_t} \,.$$

wo E_n und e_n den maximalen, beziehungsweise effektiven Ohmschen Spannungsverlust, E_t und e_t die maximale, beziehungsweise effektive gesamtelektromotorische Kraft bedeuten.

In unserem Falle sind zwei Ohmsche Widerstände in Serie geschaltet, folglich wird der gesamte Ohmsche Widerstand $r_1 + r_2$ sein. Die Stromstärke hat bei $e_t = 100$ Volt und $\sim = 50$ den Wert $i_t = 0{,}525$ Ampère, so daß der Ohmsche Spannungsverlust folgendermaßen sich ergibt:

$$e_n = i_t (r_1 + r_2) = 0{,}525 \,(10 + 20) = 0{,}525 \,.\, 30 = 15{,}75 \text{ Volt.}$$

Nun wird der Cosinus des Phasenverschiebungswinkels

$$\cos \varphi = \frac{e_n}{e_t} = \frac{15{,}75}{100} = 0{,}158$$

Digitized by Google

sein, welchem ein Winkel von rund

$$\varphi = 81^0$$

entspricht.

Würden wir anstatt effektiven Werten Maximalwerte in Berechnung gezogen haben, so hätten wir dasselbe Ergebnis bekommen, da bei Sinusveränderungen der Zusammenhang zwischen der effektiven und der maximalen elektromotorischen Kraft durch die Formel gegeben ist

$$E_{max} = \sqrt{2}\, e_{eff}$$

folglich im obigen Ausdruck:

$$\cos\varphi = \frac{e_n}{e_t} = \frac{\frac{E_n}{\sqrt{2}}}{\frac{E_t}{\sqrt{2}}} = \frac{E_n}{E_t}.$$

II. Dieselben Spulen sind parallel geschaltet nach dem Schema Fig. 39. Zu bestimmen sind die Strom- und Phasenverhältnisse.

Laut Fig. 40 sind die Phasenwinkel zwischen den Teilströmen und der gemeinsamen elektromotorischen Kraft:

$$\cos\varphi_1 = \frac{AB}{AC} = \frac{i_1 r_1}{e_t} = \frac{e_{n1}}{e_t}$$

beziehungsweise

$$\cos\varphi_2 = \frac{AD}{AC} = \frac{i_2 r_2}{e_t} = \frac{e_{n2}}{e_t}.$$

Die Sinuse dieser Winkel werden

$$\sin\varphi_1 = \frac{BC}{AC} = \frac{i_1 l_1 \omega}{e_t} = \frac{e_{s1}}{e_t}$$

Digitized by Google

und

$$\sin \varphi_2 = \frac{DC}{AC} = \frac{i_2 l_2 \omega}{e_t} = \frac{e_{s2}}{e_t}$$

sein.

Am bequemsten läßt sich der Phasenwinkel konstruieren, wenn man seine Tangente kennt, bilden wir daher aus den Vorgehenden diese Winkelfunktion. Die Tangente eines Winkels ist der

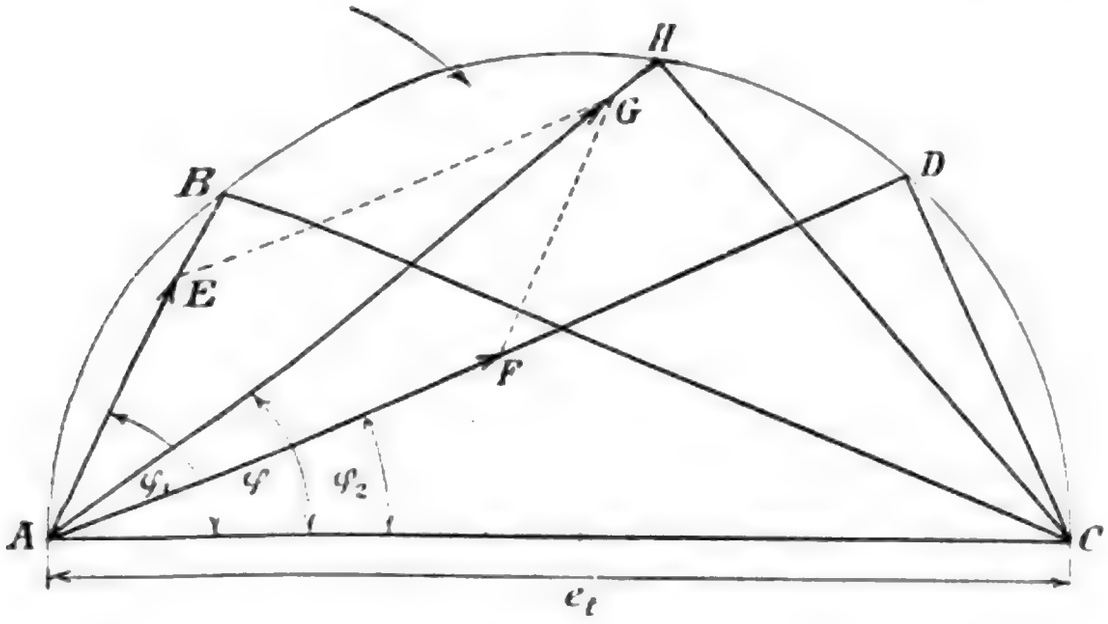


Fig. 40.

Quotient des Sinus und des Cosinus desselben Winkels, so daß

$$tg \varphi_1 = \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} = \frac{e_{s1}}{e_{n1}} = \frac{l_1 i_1 \omega}{i_1 r_1} = \frac{l_1 \omega}{r_1}.$$

Analog ist:

$$tg \varphi_2 = \frac{l_2 \omega}{r_2}.$$

Sind diese Tangenten bekannt, so sind die beiden Dreiecke ABC und ADC völlig bestimmt, da wir wissen, daß B und D an einem Kreise liegen, dessen Halbmesser die halbe gemeinsame elektromotorische Kraft ist.

In unserem Falle wird:

$$tg\,\varphi_1 = \frac{0{,}2 \cdot 314}{10} = 6{,}28$$

und

$$tg\,\varphi_2 = \frac{0{,}4 \cdot 314}{20} = 6{,}28.$$

Aus diesen beiden Ausdrücken sieht man, daß $\varphi_1 = \varphi_2$, daher $\varphi_1 = \varphi = \varphi_2$, d. h. die Dreiecke ABC, ADC und AHC decken sich vollkommen. Dies ändert an der Sache nur soviel, daß der resultierende Strom aus den Komponentströmen durch algebraische Summation auch berechnet werden kann, da die Stromvektoren alle in dieselbe Linie fallen.

Um die Verhältnisse klarer und übersichtlicher behandeln zu können, wollen wir auf diesen speziellen Fall verzichten und durch Änderung der angegebenen Werte die Phasenwinkel φ_1 und φ_2 einander ungleich machen. Es sei deshalb Spule I dieselbe als früher, die zweite Spule besitze aber einen Ohmschen Widerstand von $r_2 = 200\,\Omega$ nebst dem Selbstinduktionskoeffizienten $l_2 = 0{,}4$ Henry.

Bei diesen Verhältnissen wird daher:

$$tg\,\varphi_1 = \frac{0.2 \cdot 314}{10} = 6{,}28$$

und

$$tg\,\varphi_2 = \frac{0{,}4 \cdot 314}{200} = 0{,}628.$$

Die entsprechenden Winkel sind zirka

$$\varphi_1 = 81^0 \quad \text{und} \quad \varphi_2 = 32^0.$$

Hiermit sind die Dreiecke ABC und ADC bestimmt und können wir zur Ermittlung des Dreieckes AHC schreiten (Fig. 41).

Digitized by Google

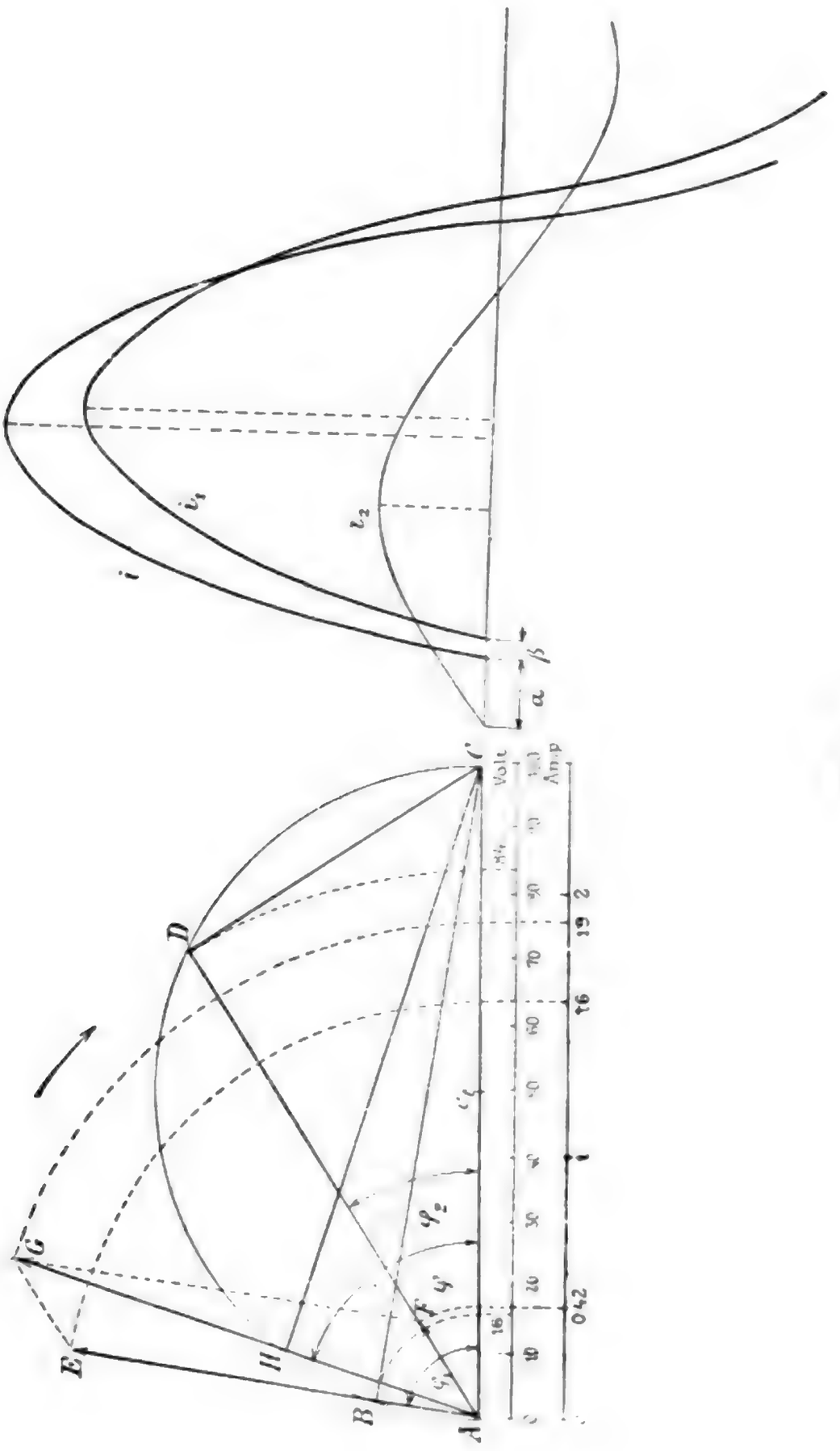


Fig. 41.

Digitized by Google

Um diese Aufgabe lösen zu können, berechnen wir zunächst die Komponentenstromstärken, welche mit ihren Vektoren in den Linien AB, beziehungsweise AD liegen.

AB und AD sind Ohmsche Spannungsverluste, aus denen die Stromstärken durch Dividieren mit den entsprechenden Widerständen berechnet werden können. Diese Spannungsverluste kann man indessen nur aus der graphischen Darstellung bestimmen, weshalb man die Länge von AB und AD im Voltmaßstab, laut welchem auch die Länge von e_1 bestimmt wurde, abmißt. Die so erhaltenen Zahlen sind die Ohmschen Spannungsverluste in Volt.

Diese Messung in unserem Falle durchgeführt, bekommen wir folgende Werte:

$$\overline{AB} = e_{n1} = 16 \text{ Volt}; \quad \overline{AD} = e_{n2} = 84 \text{ Volt}.$$

Die Widerstände sind r_1 und r_2, folglich werden die Teilströme durch die Quotienten $\frac{e_{n1}}{r_1}$ und $\frac{e_{n2}}{r_2}$ gegeben sein.

In unserem Falle sind:

$$i_1 = \frac{e_{n1}}{r_1} = \frac{16}{10} = 1{,}6 \text{ Ampère}$$

und

$$i_2 = \frac{e_{n2}}{r_2} = \frac{84}{200} = 0{,}42 \text{ Ampère}.$$

Nun schreiten wir zur Konstruktion des resultierenden Stromes nach Art der Konstruktion der resultierenden Kraft aus den Komponentkräften. Die resultierende Stromstärke kann aber nur dann konstruiert werden, wenn die Werte obiger Komponentstromstärken durch die Längen ihrer Vektore bekannt sind. Man nimmt daher einen geeigneten Maßstab für die Stromstärken an, mißt

Digitized by Google

daran i_1 und i_2 ab, und trägt die so erhaltenen Längen auf $\overline{AB}$, beziehungsweise $\overline{AD}$. Die entsprechenden Punkte sind E und F, also $AE = i_1$ und $AF = i_2$.

Die resultierende Stromstärke ist $i = \overline{AG}$, dies ist zugleich die Lage ihres Vektors. Dieser Strom ist gegen die Spannung um den Winkel φ phasenverspätet. Seine Größe kann auch durch Berechnung bestimmt werden, indem man nach Carnots Regel

$$i^2 = i_1^2 + i_2^2 - 2\, i_1\, i_2 \cos(180^0 - [\varphi_1 - \varphi_2])$$

setzt. Da aber

$$\cos(180^0 - [\varphi_1 - \varphi_2]) = -\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

ist, wird

$$i^2 = i_1^2 + i_2^2 + 2\, i_1\, i_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Die Länge AG im Strommaßstabe gemessen gibt die resultierende Stromstärke in Ampère. Es ist $i = 1{,}9$ Ampère.

Die Vektoren aller Stromstärken sind nun bekannt, sehen wir, in welcher Weise lassen sich die Phasenverhältnisse im Wellendiagramm darstellen.

Die Fig. 41 ist nicht nur auf die Effektiv-, sondern auch auf die Maximalwerte von Giltigkeit, da diese zwei Werte voneinander nur in einer Konstante abweichen. Diese Konstante ist bei Sinusveränderungen $\sqrt{2}$, da wie bekannt

$$J_{max} = \sqrt{2}\, i_{eff}.$$

Wenn wir nun Maximalwerte in Betracht nehmen, dann sind AB und AD die Maximalwerte der Ohmschen Spannungsverluste, ebenso BC und DC jene der induktiven Spannungsabfälle. Die Stromstärken AE und AF sind nun Maximalwerte der Teilströme und AG ist der Maximalwert des

Digitized by Google

resultierenden Stromes. AE, AG und AF sind demnach in diesem Sinne Vektorgrößen und diese können bei der Bestimmung des Wellendiagrammes benutzt werden.

Nehmen wir den resultierenden Strom in erster Reihe in Betracht. Seine Änderungen mit dem Phasenwinkel können durch eine Sinuskurve dargestellt werden, welche in der nebenstehenden Teilfigur mit i bezeichnet und deren maximaler Wert mit AG gleich groß ist.

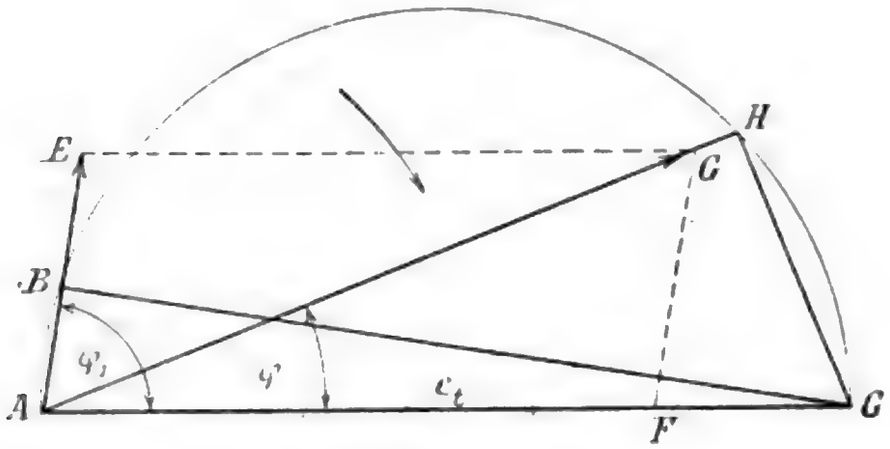


Fig. 42.

Nachdem bei induktiven Belastungen die Stromstärke zur elektromotorischen Kraft in Phase zurückbleibt, wird in bezug auf die Stromstärke i der Strom i_2 um den Winkel $(\varphi - \varphi_2)$ in Phase voreilen, der Strom i_1 dagegen mit $(\varphi_1 - \varphi)$ in Phase zurückbleiben.

Dies wissend, können wir zur Bestimmung der anderen zwei Sinuskurven schreiten. Zuvörderst wird der Null- oder Maximalpunkt der Kurve i_2 vor jenem der Kurve i in Phase um den Winkel $\alpha = \varphi - \varphi_2$ liegen. Nachdem Kurve i völlig bekannt ist und die Perioden für alle Ströme in diesem Stromkreise gleich sind, wird die Kurve i_2 ähnlich jener von i konstruiert, indem man ihren Maximalwert gleich AF setzt.

Digitized by Google

In analoger Weise ist der Maximalwert der Kurve i_1 gleich AE, die Kurve selbst wird dadurch bestimmt, daß man ihren Nullpunkt vom Nullpunkte der Kurve i um den Phasenwinkel $\beta = \varphi_1 - \varphi$ in dem Sinne verschiebt, daß i_1 zu i in Phase verspätet wird.

Hiermit ist unsere Aufgabe gelöst. Wollten wir auch noch die Spannungskurve im Wellendiagramm einzeichnen, dann müßten wir vom Nullpunkte der Kurve i den Phasenwinkel φ von rechts nach links auftragen, da die e_t Spannung allen Strömen gegenüber in Phase voreilt. Die Phasenverschiebung ist indessen für die drei Ströme nicht dieselbe, vielmehr hat sie die Werte φ, φ_1, φ_2.

Wie werden die Phasen- und Stromverhältnisse graphisch dargestellt, wenn ein Ohmscher Widerstand mit Ohmschem Widerstande nebst Selbstinduktion parallel geschaltet wird?

Dieser Fall tritt ein, wenn z. B. $l_2 = 0$, denn da wird die Impedanz gleich mit dem Ohmschen Widerstande und Ohms Gesetz ist in der Weise anzuwenden, wie beim Gleichstrome.

Für die Spule I bleiben die Verhältnisse unverändert dieselben wie zuvor.

Wenn $l_2 = 0$, dann ist der induktive Spannungsabfall

$$E_s = J l_2 \omega = 0$$

d. h. die Seite DC in Fig. 41 des Dreieckes ADC schrumpft zu einem Punkte zusammen, welcher mit C zusammenfällt.

Das Dreieck ABC bleibt unverändert, folglich wird auch der Vektor der Stromstärke i_1 dieselbe Lage und Größe haben wie zuvor. Dagegen ändert sich sowohl die Lage als auch die Größe des Vektors der Stromstärke i_2, und zwar wird sie, nachdem $\varphi_2 = 0$ mit der Richtung des Vektors e_t zusammenfallen, ihre Größe wächst, da im Ausdrucke

Digitized by Google

$$i_2 = \frac{e_t}{\sqrt{r^2 + l_2^2 \omega^2}}$$

$l_2 = 0$ und somit

$$i_2 = \frac{e_t}{r}$$

wird.

Natürlich zieht die Änderung der Größe und der Vektorlage dieser Stromstärke auch eine Änderung der Größe und der Vektorlage der resultierenden Stromstärke i nach sich, so daß die Phasenverschiebungen andere Werte annehmen. Zur Spannung genommen bleibt nur φ_1 der früheren Phasenverschiebung gleich, die anderen, φ und φ_2 ändern sich, und zwar wird φ kleiner als im vorhergehenden Falle und $\varphi_2 = 0$.

Die Verhältnisse sind in Fig. 42 dargestellt.

Mit $\frac{e_t}{2}$ wird ein Halbkreis geschlagen und in diesen nach der bereits beschriebenen Weise das Dreieck $A\,B\,C$ konstruiert. φ_1 ist der Phasenwinkel zwischen der Stromstärke i_1 und der Spannung e_t, nachdem $A\,E = i_1$ mit dem Vektor $A\,B$ zusammenfällt.

i_2 ist hingegen mit e_t in Phase, weshalb $A\,F = i_2$ auf die Linie $A\,C$ getragen werden muß. Aus $A\,E$ und $A\,F$ wird dann die resultierende Stromstärke $A\,G = i$ konstruiert, welche zur Spannung e_t mit dem Winkel φ phasenverspätet ist. Die Verlängerung des Vektors $A\,G$ schneidet den Halbkreis in H, welches mit A und C ein Dreieck bestimmt, das für die resultierende Ohmsche und induktive Spannungsverluste maßgebend ist.

Leistung eines Wechselstromes.

Auf Seite 79 sahen wir, daß die Leistung eines Wechselstromes bei der Spannung e_{eff} und und der Stromstärke i_{eff} durch

Digitized by Google

$$W = e_{eff}\, i_{eff} \cos\varphi$$

gegeben ist, wenn φ den Phasenunterschied zwischen der Spannung und des Stromes bedeutet.

Betrachten wir in Fig. 34 die Vektoren der Spannungen und der Stromstärke, so sehen wir, daß

$$\overline{OC} = \overline{OD} \cos\varphi = E_t \cos\varphi.$$

Hierbei war $\overline{OA} = J$ der Stromvektor, so daß die Leistung des Wechselstromes durch das Produkt

$$\overline{OA} \,.\, \overline{OC} = J E_t \cos\varphi = J E_n = W$$

ausgedrückt werden kann.

In obiger Gleichung sind J und E_t maximale Werte, die Gleichung ist aber auch auf effektive Werte giltig, da

$$W = \frac{J}{\sqrt{2}} \frac{E_t}{\sqrt{2}} \cos\varphi = i_{eff}\, e_{eff} \cos\varphi.$$

Die Leistung eines Wechselstromes ist demnach bei Phasenverschiebung gleich mit dem Produkt der effektiven Stromstärke und jener Komponente der effektiven Spannung, welche in die Richtung des Vektors der Stromstärke fällt.

Die letzte Gleichung kann aber auch folgendermaßen geschrieben werden:

$$w = e_{eff}\, i_{eff} \cos\varphi = e_{eff}\, i_n$$

wo

$$i_n = i_{eff} \cos\varphi$$

i_n ist als eine Komponente des Stromes aufzufassen, welche in die Richtung der Spannung fällt. Ebenso wie die Spannung in zwei aufeinander senkrechte Komponente zerlegt werden

Digitized by Google

kann, kann die Stromstärke auch als aus zwei Komponenten bestehend betrachtet werden, deren eine in die Richtung des Spannungsvektors, die andere dagegen in eine, auf diese senkrechte Richtung fällt.

Diese Verhältnisse sind in Fig. 43 dargestellt. $\overline{OA}$ ist der Vektor der Spannung e_t. Der Stromvektor ist durch $\overline{OB} = i$ gegeben und der

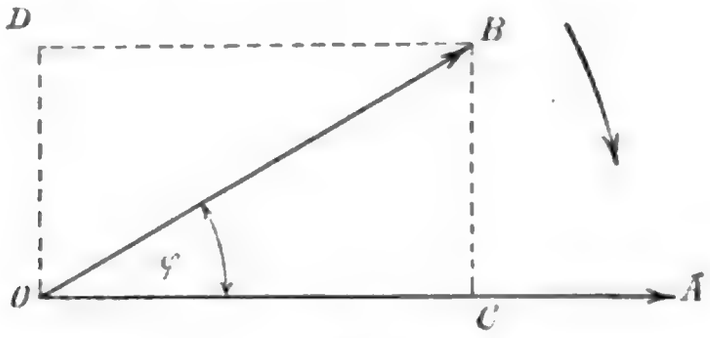


Fig. 43.

Phasenunterschied zwischen diesen zwei Wechselgrößen ist mit φ bezeichnet. Wie gesagt, betrachten wir die Stromstärke als eine resultierende Größe, welche zwei aufeinander senkrechte Komponenten hat und deren eine in die Richtung $\overline{OA}$ der Spannung fällt. Diese Komponente ist $\overline{OC}$. Die Größe derselben wird durch die Formel

$$\overline{OC} = i_n = i \cos \varphi$$

ausgedrückt.

Die zweite Komponente ist auf die erste senkrecht und mit $\overline{OD}$ bezeichnet. Ihre Größe wird

$$\overline{OD} = i_o = i \sin \varphi$$

sein.

Aus beiden Gleichungen folgt die zwischen beiden Teilströmen und der resultierenden Stromstärke bestehende Beziehung, wonach

$$i^2 \ (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = i_n^2 + i_o^2$$

Digitized by Google

oder da

$$\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi = 1$$

ist,

$$i^2 = i_n + i_o^2$$

oder

$$i = \sqrt{i_o^2 + i_n^2}.$$

Die Wattleistung des Wechselstromes hängt bei konstanter Spannung von der Größe i_n ab, weshalb man diesen Strom als die Wattkomponente des Wechselstromes bezeichnet. Die Wattkomponente ist mit der Spannung in Phase, für diese Komponente ist aber das Ohmsche Gesetz unverändert in derselben Form giltig, wie beim Gleichstrome.

Die zweite Komponente i_o ist senkrecht auf den Spannungsvektor. Nachdem aus dem bisherigen klar ist, daß die Leistung des Wechselstromes auch als das Produkt der Spannung und des Wattstromes ausgedrückt werden kann, folgt, daß i_o keiner Arbeit entspricht. Ihre Projektion auf $\overline{OA}$ ist Null, folglich wird der Wert des öfters genannten Produktes auch Null, weshalb man i_o den wattlosen Strom nennt.

Aus alledem geht hervor, daß, wenn in einem Wechselstromkreise Phasenverschiebung ist, der Gesamtstrom immer als ein, aus einem Watt- und einem wattlosen Strome resultierender Strom betrachtet werden kann, bei dem aber nur der Wattstrom Arbeit leistet, die andere dagegen nur Spannungsänderungen im Äther verursacht.

Solche Änderung im Spannungszustande des Äthers ist z. B. das magnetische Feld. Bei einem Wechselstrome ändert sich das magnetische Feld periodisch, ebenso wie die Stromstärke und nachdem zur Hervorrufung des Feldes eben die wattlose Komponente des Gesamtstromes nötig ist, wird diese Komponente auch Erregerstrom genannt.

Digitized by Google

Im Gegensatz hierzu ist die Wattkomponente der Arbeitsstrom.

Die Größe des Erregerstromes hängt von den Dimensionen der Spule, dem Eisenkerne und der Intensität des hervorgerufenen magnetischen Feldes ab. Das Produkt $i_0 e_t$ ist keine effektive Arbeit, da bei Wechselströmen, bei denen der Strom der Spannung in der Phase um 90° verschoben ist, gleich große positive und negative Arbeiten entstehen, deren algebraische Summe Null ist, wie dies auch bei Fig. 31 graphisch dargestellt worden ist.

Eine Disposition, bei welcher nur wattlose Ströme auftreten, ist nicht durchzuführen, da im Eisen infolge der wechselnden magnetischen Feldintensität Hysteresisarbeit und Foucaultströme entstehen, welche eine Erwärmung hervorrufen. Diese Wärme ist effektive Arbeit und ist als ein Energieverlust zu betrachten, da sie in die umgebende Luft ausgestrahlt wird. Hierzu kommt noch die Wärmemenge, welche in der Leitung entsteht, die sogenannte Drahtwärme, und allen diesen Effektverlusten entspricht ein Wattstrom, welcher verursacht, daß der entstehende Gesamtstrom größer als der Erregerstrom und daß der Phasenwinkel kleiner als 90° wird. Würde $\varphi = 90°$, dann wäre

$$i_n = i \cos \varphi = i . 0 = 0$$

und die Leistung des Wechselstromes ebenfalls

$$w = e_t i_n = e_t 0 = 0$$

sein.

Nachdem i_n und e_t in Phase zusammenfallen, hat das Ohmsche Gesetz für sie Giltigkeit und die geleistete Arbeit wird ebenso ausgedrückt wie beim Gleichstrome. Kennt man also bei einer Disposition die Wattverluste, dann kann der Arbeitsstrom i_n immer berechnet werden.

Digitized by Google

Nehmen wir eine Induktionsspule in Betracht, welche einen Eisenkern hat, dann entstehen bei Einschalten des Stromes im Eisenkerne Hysteresis- und Wirbelstromverluste, welche eine gewisse äquivalente elektrische Energie in Wärme umsetzen. Ein anderer Energieverlust entsteht dadurch, daß der Leiter der Spule vom Strome erwärmt wird. Bezeichnet man alle diese Arbeitsverluste mit W, dann kann die Wattkomponente des Gesamtstromes folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$i_n = \frac{W}{e_t}$$

da

$$W = e_t\, i_t \cos\varphi = e_t\, i_n$$

W substituiert erhalten wir den gesuchten Wert des Arbeitsstromes.

Manchmal sind die Verhältnisse solche, daß man den Phasenverschiebungswinkel φ nicht kennt. In solchen Fällen berechnet man den Erregerstrom und aus der Gleichung

$$i_t = \sqrt{i_o^2 + i_n^2}$$

bestimmt man den Wert von i_t oder i_n.

Um den Erregerstrom berechnen zu können, bedarf man der Dimensionen des Eisenkernes der Spule, der Windungszahl des Leiters und des Maßes für die Intensität des magnetischen Feldes. Letzteres wird durch die Anzahl jener Kraftlinien gemessen, welche durch die auf ihre Richtung senkrechte Flächeneinheit durchdringen.

Sind die Dimensionen des Eisenkernes bekannt, so kann der mittlere Kraftlinienweg mit einfachen geometrischen Formeln berechnet werden. Sei diese Länge l. Wenn die Spule n Windungen hat und die Erregerstärke i_o ist, dann wird die

Digitized by Google

auf die Längeneinheit bezogene magnetisierende Kraft durch die Gleichung

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{n i_o}{l}$$

gegeben.

Nachdem aber

$$\mathfrak{B} = \mu H$$

wo $\mathfrak{B}$ die auf die Flächeneinheit bezogene Kraftlinienzahl und μ die magnetische Durchlässigkeit oder die Permeabilität des Eisens bei der Kraftlinienzahl $\mathfrak{B}$ bedeutet, wird

$$\frac{\mathfrak{B}}{\mu} = \frac{4\pi}{10} \frac{n i_o}{l}$$

und hieraus

$$i_o = \frac{\mathfrak{B}}{\mu} \frac{l}{n} \frac{10}{4\pi}$$

die gesuchte Erregerstromstärke.

Der Wert der Permeabilität hängt von der Größe $\mathfrak{B}$ ab. Nachdem dieser Zusammenhang nur durch komplizierte Berechnungen zu ermitteln ist, hat man zwischen $\mathfrak{B}$ und H Diagramme, die sogenannten Magnetisierungskurven hergestellt und aus den zusammengehörigen $\mathfrak{B}$ und H Werten, laut der Formel

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{H}$$

den Wert der Permeabilität bestimmt. Die so erhaltenen Werte sind in ihrem Zusammenhange mit $\mathfrak{B}$ ebenfalls graphisch dargestellt, man kann also für jede beliebige $\mathfrak{B}$ das entsprechende μ leicht finden.

Digitized by Google

Beispiel.

Es sei eine Induktionsspule mit geschlossenem Eisenkerne gegeben. Der mittlere Kraftlinienweg beträgt 20 *cm*. Die Kraftlinienzahl sei pro cm^2 15 500, alsdann wird die Permeabilität bei Schmiedeeisen $\mu = 408$ sein. Der Eisenkern ist mit 400 Windungen versehen; wie groß ist die Erregerstromstärke i_o?

Nach obigen Ausführungen wird:

$$i_o = \frac{15\,500}{408}\,\frac{20}{400}\,\frac{10}{4 \times 3{,}14} = 0{,}151 \text{ Ampère.}$$

Wenn für alle Verluste 400 Watt elektrischer Energie nötig sind, wie groß ist der Wattstrom i_n?

Die Spule sei zwischen zwei Punkte geschaltet, zwischen welchen die Potentialdifferenz $e_t = 100$ Volt herrscht.

Nach Seite 125 ist der gesuchte Wattstrom

$$i_n = \frac{W}{e_t} = \frac{400}{100} = 4 \text{ Ampère.}$$

Wie groß ist der Gesamtstrom i_t welcher in der Leitung fließt?

$$i = \sqrt{i_o^2 + i_n^2} = \sqrt{0{,}151^2 + 4^2}$$

oder

$$i_t = 4{,}01 \text{ Ampère.}$$

i_t ist bald so groß als i_n. Das bedeutet soviel, daß in diesem Falle der Erregerstrom verhältnismäßig klein und die Phasenverschiebung zwischen der Spannung und der Stromstärke ebenfalls klein ist.

Es ist der Cosinus des Phasenverschiebungswinkels φ zu bestimmen.

$$\cos\varphi = \frac{i_n}{i_t} = \frac{4}{4{,}01} = 0{,}9975.$$

Diesem entspricht ein Winkel von zirka 4^0.

Die Leistung eines Wechselstromes kann in sehr übersichtlicher Weise auch graphisch dargestellt werden.

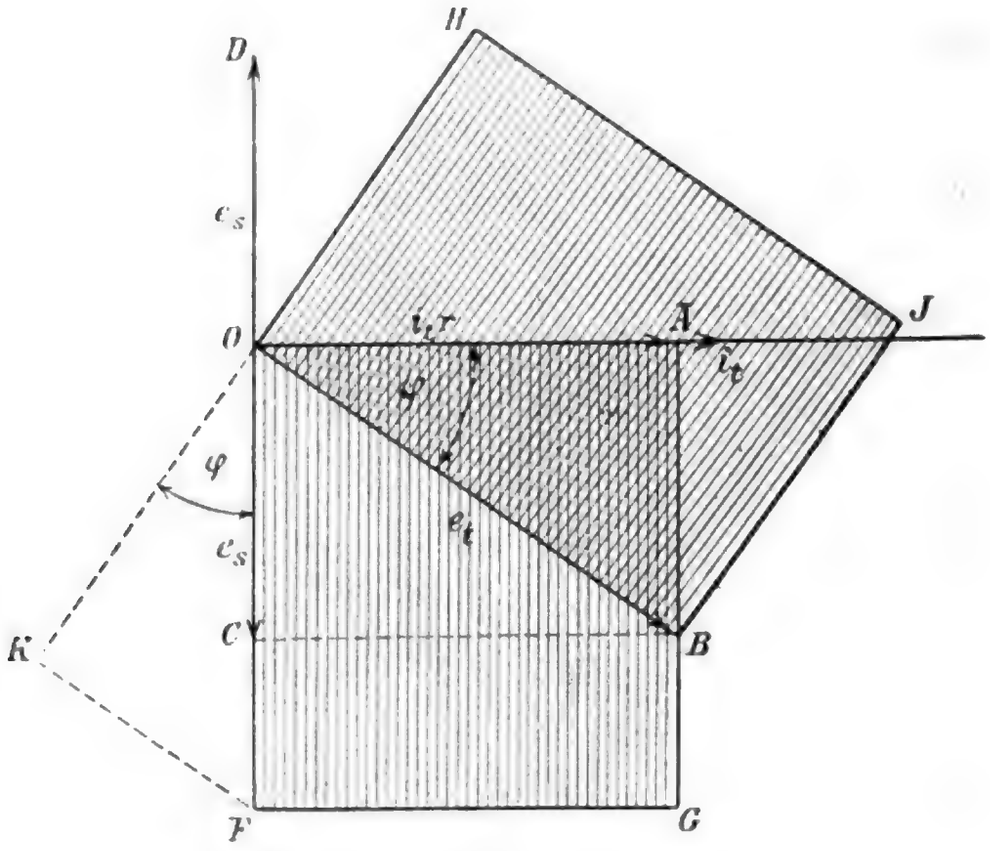


Fig. 44.

Die Konstruktion des entsprechenden Diagrammes basiert auf der Gleichung

$$W = e_t\, i_t \cos\varphi.$$

Wir wissen, daß wenn in einem Wechselstromkreise Ohmscher Widerstand und Selbstinduktion vorhanden sind, die Stromstärke hinter der Spannung in der Phase zurückbleibt. In obiger Gleichung ist φ dieser Phasenverspätungswinkel.

Digitized by Google

Diese Verhältnisse sind in Fig. 44 graphisch dargestellt. Der Vektor der Stromstärke fällt in die Richtung $\overline{OA}$, jener der elektromotorischen Kraft in $\overline{OB}$. Diese letztere bildet mit $\overline{OA}$ den Winkel φ, folglich wird ihre Komponente, welche dem Ohmschen Spannungsverlust entspricht ir sein, wenn r den Ohmschen Widerstand bedeutet. Die Größe dieser Spannungskomponente sei $\overline{OA}$. Die zweite Komponente von $\overline{OB} = e_t$ ist $\overline{OC} = e_s$ und dient zur Kompensierung der gegenelektromotorischen Kraft der Selbstinduktion.

Wenn man also die Leistung eines Wechselstromes bestimmen will, dann muß man das Produkt $i_t r \,.\, i_t = i_t^2 r$ bilden, denn

$$i_t r = e_t \cos\varphi$$

und

$$i_t r \,.\, i_t = i_t^2 r = e_t i_t \cos\varphi = W.$$

Der Ausdruck $i_t^2 r$ ist nichts anderes als der Flächeninhalt eines Parallelogrammes, dessen eine Seite $i_t r = \overline{OA}$ die anderen i_t ist. Stellt man daher im Punkte O eine Senkrechte auf OA und trägt auf diese eine, dem Werte i_t entsprechende Länge $\overline{OF}$, dann wird die Fläche des Parallelogrammes $OAGF$ mit der geleisteten Arbeit proportional sein.

Die letzte Gleichung kann aber auch anders aufgefaßt werden und zwar in der Weise, daß e_t konstant gedacht und die Stromstärke i_t auf zwei, aufeinander senkrechte Komponenten zerlegt wird. Alsdann muß e_t mit der in ihre Richtung fallenden Komponente multipliziert werden, um die Leistung bekommen zu können.

Diese Komponente des Stromes wird $i_t \cos\varphi$ sein. Trägt man nun diese Länge auf eine auf e_t senkrechte Linie OH auf, dann bildet $OHJB$ ein Parallelogramm, dessen Flächeninhalt gleich mit

Digitized by Google

jenem von $OAGF$ ist, d. h. welches auch der geleisteten Arbeit proportional wird.

$\overline{OK} = \overline{OH}$, da $\overline{OF} = i_t$ und $\sphericalangle KOF = \varphi$, denn $\overline{KO} \perp \overline{OB}$ und $\overline{FO} \perp \overline{OA}$ wobei $\sphericalangle BOA = \varphi$ ist. Die beiden, mit der Leistung zu vergleichenden Parallelogramme sind in der Figur schraffiert bezeichnet.

Der induktive Widerstand wird in der Wechselstromtechnik häufig benutzt. Seine gute Eigenschaft ist, daß er im Verhältnis zum induktionslosen Widerstande wenig Energie verbraucht, denn es entsteht in ihm eine gegenelektromotorische Kraft, welche dem Anwachsen der Stromstärke entgegentritt.

Eine weitere gute Eigenschaft besteht darin, daß der induktive Widerstand in gewissen Grenzen sich selbst reguliert. Wird nämlich die elektromotorische Kraft größer, dann fließt ein stärkerer Strom durch den Stromkreis, dies bewirkt aber gleichzeitig ein Anwachsen der gegenelektromotorischen Kraft der Selbstinduktion, da das magnetische Feld infolge des stärkeren Erregerstromes intensiver wird.

Allerdings ist die Verwendung solcher Induktionswiderstände auch mit Nachteil verbunden. Dieser Nachteil besteht darin, daß der Strom zur Spannung in der Phase verschoben wird und hierdurch wattlose Ströme entstehen, welche zwar keine effektive Arbeit leisten, doch die Maschinen und die Leitungen belasten. Je größer die Phasenverschiebung, um so größer ist die wattlose Komponente, d. h. um so größer muß der Gesamtstrom werden, um dieselbe effektive Leistung hervorbringen zu können und hierdurch wird die Leitung mehr belastet als dies der effektiven Arbeitsleistung entspricht.

Betrachten wir einen speziellen Fall der Verwendung der Induktionsspule. Die übliche Spannung

Digitized by Google

ist in Wechselstromkreisen gewöhnlich so groß, daß eine Bogenlampe nicht direkt eingeschaltet werden kann, sondern man muß auch noch einen Widerstand vorschalten, welcher die überschüssige Spannung absorbiert.

Für Vorschaltwiderstand kann man entweder einen induktionslosen oder einen induktiven Widerstand benutzen. Bei ersterem wird die überschüssige Spannung gänzlich durch den Ohmschen Spannungsabfall kompensiert, die verbrauchte Energie ist in solchem Falle also ganz in Wärme umgesetzt worden und beträgt ihr Wert eine Wattmenge, welche berechnet werden kann, wenn man obigen Spannungsverlust mit der, den induktionslosen Widerstand durchfließenden Stromstärke multipliziert.

Bei Induktionswiderständen sind die Verhältnisse andere. Es entsteht zwar auch hier ein Ohmscher Spannungsverlust, doch ist dieser nur ein Teil der kompensierenden Spannung, welche sich als eine Resultante des obigen und des induktiven Spannungsverlustes ergibt.

Der Ohmsche Spannungsverlust und die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion sind einander in Phase um 90^0 verschoben, die resultierende elektromotorische Kraft, oder in diesem Falle die resultierende, kompensierende Spannung wird in ihrem Vektorwerte durch die Diagonale eines Parallelogrammes gegeben, dessen zwei Seiten durch die Vektoren der beiden oben genannten Spannungen gegeben sind.

Ist der Ohmsche Spannungsabfall $i\,r = e_n$ und die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion $i\,l\,\omega = e_s$, dann ist die Größe der resultierenden Spannung

$$e = \sqrt{e_n^2 + e_s^2}.$$

Nach alledem berechnen wir für einen speziellen Fall einen induktiven Vorschaltwiderstand.

Eine Wechselstrombogenlampe, welche mit 10 Ampère brennt, beansprucht eine Spannung von 30 Volt. Die Spannung des Stromkreises ist 100 Volt, folglich muß man, um das Anwachsen des Stromes über 10 Ampère verhindern zu können, einen Vorschaltwiderstand benutzen. Die Wechselstrombogenlampen haben Dochtkohlen, bei welchen keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung entsteht, weshalb diese Lampen als induktionslose Widerstände zu betrachten sind.

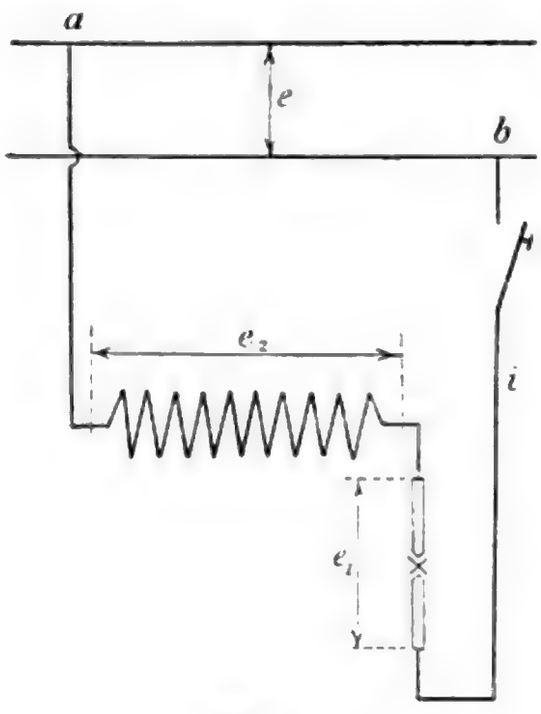


Fig. 45.

Die Schaltungsanordnung ist aus der Fig. 45 ersichtlich. Die Lampe samt Vorschaltwiderstand wird bei den Punkten *a b* von der Hauptleitung, in welcher die konstante Spannungsdifferenz $e = 100$ Volt herrscht, abgezweigt. Längs der Lampe und des Induktionswiderstandes muß diese Spannungsdifferenz kompensiert werden. Die Spannungen im Verbrauchskreise sind e_1 und e_2, doch ist die algebraische Summe beider nicht e, denn sie sind in ihren Phasen gegeneinander verschoben.

Die Spannung e_1 ist mit dem Strome i in Phase, da die Lampe, wie bereits oben gesagt, einen induktionslosen Widerstand bildet. Die Spannung e_2 ist hingegen in der Phase verschoben, der Phasenverschiebungswinkel kann rechnerisch, wie auch graphisch bestimmt werden.

Wir haben hier eigentlich mit vier Spannungen zu tun. Die erste ist die gegebene Spannung e des Stromkreises, die zweite der Ohmsche Spannungsabfall e_1 längs des Widerstandes der Bogenlampe.

Die dritte und die vierte Spannung sind Komponentspannungen des Spannungsabfalles e_2 und zwar ist eine Komponente der Ohmsche Spannungsverlust in der Induktionsspule, die zweite dagegen die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion. Die Vektoren dieser Teilspannungen stehen senkrecht aufeinander.

Zur graphischen Behandlung übergehend, bezeichne in Fig. 46 AB die Gesamtspannung e. Diese kann als eine Resultante der obenerwähnten drei Spannungen betrachtet werden. Nehmen wir an, daß in der Induktionsspule keine Ohmschen

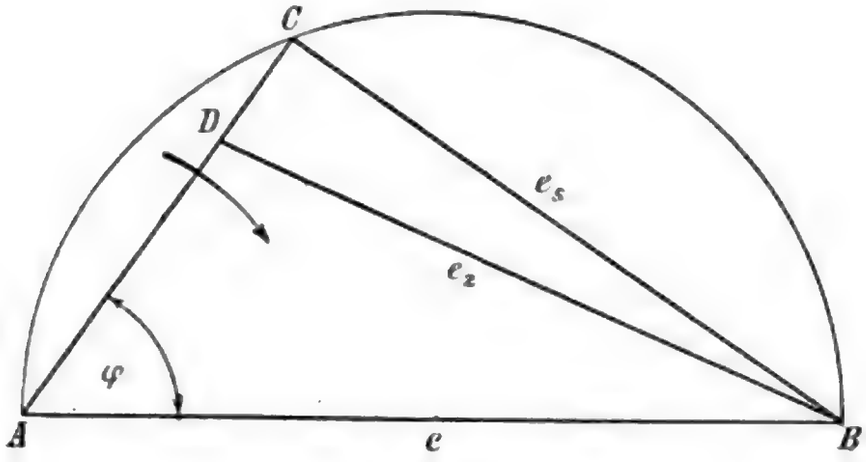


Fig. 46.

Spannungsverluste auftreten, sondern nur die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion, dagegen in der Bogenlampe nicht nur der Ohmsche Spannungsverlust, sondern auch derjenige der Induktionsspule zur Geltung kommt, dann haben wir den einfachen Fall in Serie geschalteter Selbstinduktion und Ohmschen Widerstandes, wir können also für diesen Fall das Diagramm konstruieren.

In bekannter Weise schlägt man mit dem Halbmesser $\frac{e}{2}$ um AB einen Halbkreis, berechnet den gesamten Ohmschen Spannungsabfall, mißt dies in dem Spannungsmaßstabe und bestimmt

den Punkt C. AC ist demnach dem Ohmschen Spannungsverluste im ganzen Stromkreise proportional. Dieser besteht aus zwei Teilen, und zwar aus $\overline{AD}$, welcher mit dem Ohmschen Spannungsabfall in der Bogenlampe proportional ist und $\overline{DC}$, welcher ein Maß für den Spannungsverlust infolge des Ohmschen Widerstandes der Induktionsspule ist.

Das Dreieck DCB ist demnach für die Spannungsverhältnisse in der Induktionsspule maßgebend und ist $\overline{DB}$ die resultierende Spannung des Ohmschen und des induktiven Spannungsabfalles in der Induktionsspule, also die Spannung e_2.

Es ist klar, daß e sich als die resultierende Spannung von e_2 und $\overline{AD} = e_1$ ergibt. $\overline{AD}$ ist zugleich die Richtung des Stromvektors, da dieser mit dem Vektor des Ohmschen Spannungsverlustes zusammenfällt. Der Winkel φ ist die Phasenverschiebung zwischen der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft.

Kennt man e und e_1, dann wird die Spannung zwischen den Endpunkten der Induktionsspule durch die Gleichung

$$e_2 = \sqrt{e_1^2 + e^2 - 2\, e_1\, e \cos\varphi}$$

gegeben.

Die vollständige Berechnung eines solchen Induktionswiderstandes werden wir bei den Transformatoren geben, da wir jetzt unseren Erörterungen nicht vorgreifen wollen. Es sei nur soviel angegeben, daß der Erregerstrom für diese Spule 8 Ampère beträgt. Es wird somit der Arbeitsstrom

$$i_n = \sqrt{i_i^2 - i_o^2} = \sqrt{10^2 - 8^2}$$

$$i_n = \sqrt{36} = 6 \text{ Ampère}$$

Digitized by Google

sein und der Cosinus des Phasenverschiebungswinkels

$$\cos\varphi = \frac{i_n}{i_t} = \frac{6}{10} = 0{,}6.$$

Der Spannungswert e_2 kann aus diesen Werten berechnet werden, denn es wird:

$$e_2 = \sqrt{30^2 + 100^2 - 2 \cdot 30 \cdot 100 \cdot 0{,}6} = \sqrt{7300}$$

oder

$$e = 85{,}5 \text{ Volt.}$$

Aus diesen Ergebnissen ist auch zu ersehen, daß die algebraische Summation bei Wechselströmen nicht ohne weiteres angewendet werden darf; so wäre auch in unserem Falle falsch, den Wert e_2 in der Weise auszurechnen wie beim Gleichstrome, denn dies würde statt $e_2 = 85{,}5$ Volt nur

$$e_2 = e - e_1 = 100 - 30 = 70 \text{ Volt}$$

ergeben.

V. Kapitel.

Kondensator im Wechselstromkreise.

Zwei voneinander isolierte und einander gegenüberstehende Metallplatten bilden einen Kondensator. Dieser Apparat hat die Eigenschaft, mit einer Stromquelle verbunden, eine gewisse Elektrizitätsmenge aufnehmen zu können. Je größer die wirkende Spannung der Stromquelle, je größer die gegenüberstehenden Flächen und je dünner die isolierende Schicht ist, um so größer wird die angenommene Elektrizitätsmenge sein.

Die Metallplatten heißen die Belege, die isolierende Schicht das Dielektrikum des Kondensators. Die Strommenge, welche ein Kondensator aufnehmen kann, gibt ein Maß für die Kapazität desselben.

Die Kapazität des Kondensators ist von der Beschaffenheit der Belegungen unabhängig, ihr Wert hängt lediglich nur von der Größe der gegenüberstehenden Flächen und den Eigenschaften der isolierenden Schicht ab. Jeder Isolator hat in dieser Hinsicht bestimmte Eigenschaften, welche durch seine Dielektrizitätskonstante zum Ausdruck kommen.

Betrachten wir zunächst, wie verhält sich ein Kondensator in einem Gleichstromkreise.

Wird die konstante Spannung besitzende Stromquelle mit den beiden Belegen des Konden-

Digitized by Google

sators verbunden, dann entstehen in den Zuleitungen Strömungen, welche aber nicht konstant sind, sondern allmählich abnehmen. Nach einer bestimmten Zeit hören diese Strömungen ganz auf, und der Zustand des Leiterkreises scheint derselbe zu sein, wie im Anfang vor dem Zusammenschalten.

Die Erscheinung, welche soeben beschrieben wurde, heißt die Ladung des Kondensators. Ein in normalen Verhältnissen befindlicher Kondensator besitzt die Fähigkeit, eine gewisse Strommenge aufzunehmen, wird er mit einer Stromquelle verbunden, dann ist die Gelegenheit gegeben, diese Strommenge aufnehmen zu können und die Erscheinung der Ladung tritt ein. Wie immer, hängt auch hier die durch die Leitung fließende Stromstärke von den Widerstandsverhältnissen insofern ab, daß der Kondensator, welcher zwar eigentlich eine Unterbrechung des Stromkreises bedeutet, doch nicht als eine solche sich verhält, da sie die oben besprochene Fähigkeit, Strom aufnehmen zu können, besitzt. Immerhin ist diese Fähigkeit nicht konstant im Verlaufe der Ladung, sondern sie nimmt immer mehr ab, bis sie gänzlich verschwindet.

Die Ursache hierzu liegt darin, daß die Spannungsdifferenz zwischen den Belegen des Kondensators um so größer wird, je größer die aufgenommene Strommenge ist, und sie erreicht ihr Maximum, wenn die Ladung schon überhaupt beendet ist, d. h. wenn der Kondensator bereits eine solche Strommenge aufgenommen hat, welche ihrer Kapazität bei den gegebenen Verhältnissen entspricht. Diese Potentialdifferenz ist aber im Stromkreise als ein Widerstand zu betrachten, denn wenn man ihr Vorzeichen untersucht, findet man, daß dasselbe demjenigen der Stromquelle entgegengesetzt ist. Wenn der Kondensator geladen ist, dann wird

die genannte Potentialdifferenz der Spannung der Stromquelle gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet, d. h. in diesem Zeitpunkte sind in einem Stromkreise zwei wirkende Potentialdifferenzen, welche einander gegenseitig aufheben und es kann folglich keine elektrische Strömung stattfinden.

Der gesamte Leiterkreis ist also bei geladenem Kondensator in einem Spannungszustande, welcher sich auszugleichen sucht. Diese Ausgleichung kann stattfinden, wenn man den Kondensator ausschaltet und seine Belege miteinander leitend verbindet. Nachdem durch das Ausschalten die durch die Spannung der Stromquelle gebunden gewesene Kondensatorspannung nun frei zur Geltung kommen kann, entsteht im verbindenden Drahte eine elektrische Strömung, welche indes nicht konstant, sondern veränderlich ist, da die Kondensatorspannung fortwährend abnimmt.

Diesen Vorgang nennt man das Entladen des Kondensators. Sie ist beendet, wenn die Belege ihren normalen Zustand erreicht haben, d. h. wenn zwischen ihnen keine Potentialdifferenz mehr besteht. Würde man den in dieser Weise entladenen Kondensator wieder in den ersten Stromkreis schalten, dann würde er wieder Strom aufnehmen, oder was dasselbe ist, man könnte den Kondensator von neuem laden.

Bringt man in den Stromkreis einen automatisch wirkenden Apparat, welcher die Ladung und die Entladung des Kondensators fortwährend bewirkt, dann fließt in der aus der ladenden Stromquelle führenden Leitung ein pulsierender, veränderlicher Strom, trotzdem daß die Leitung durch das Dielektrikum des Kondensators unterbrochen ist.

Bei Wechselströmen findet die Ladung und Entladung des Kondensators selbsttätig durch die Variationen der elektromotorischen Kraft statt. Wächst die wirkende elektromotorische Kraft von

Null bis zu ihrem Maximum, dann ist dies mit jenem Fall analog, daß der Kondensator in den Stromkreis eingeschaltet wird. Beim Einschalten war aber die Stromstärke am größten, da in diesem Zeitpunkte die Kondensatorspannung noch Null war. Die Ladestromstärke wird Null, wenn die Kondensatorspannung ihr positives Maximum erreicht.

Nehmen wir einen Wechselstrom in Betracht, dann sehen wir, daß bei positiver Kondensator-

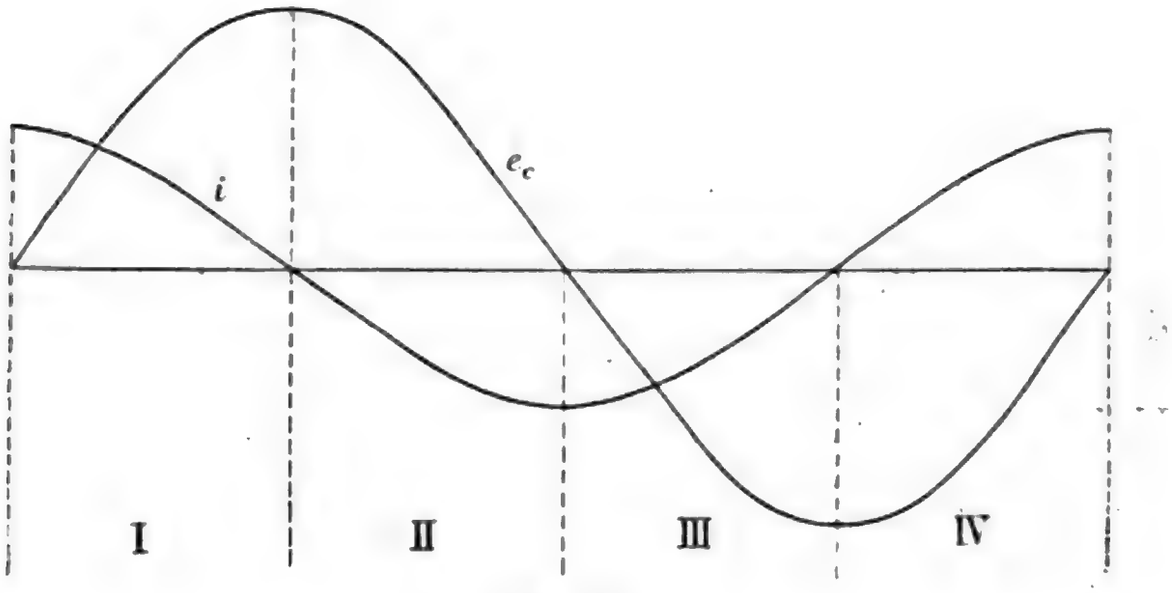


Fig. 47.

spannung die Stromstärke Null, bei Nullspannung die Ladestromstärke Maximum wird, was soviel bedeutet, daß die Spannung und die Stromstärke in ihren Phasen gegeneinander um eine Viertelperiode verschoben sind, und zwar eilt die Kondensatorspannung der Stromstärke in der Phase nach.

In Fig. 47 sind diese Verhältnisse für sinusförmigen Verlauf des Stromes und der Spannung dargestellt.

e_c ist die Kurve der Kondensatorspannung, i jene der Stromstärke. Im Periodenviertel I wird der Kondensator durch den Wechselstrom geladen.

Die Stromstärke ist anfangs maximal, $e_c = o$, während der Ladung nimmt erstere ab, letztere zu, bis am Ende derselben $i = o$ und e_c Maximum wird. Die Ladung ist nun beendet.

Die II. Viertelperiode entspricht der Entladung des Kondensators. Die Stromstärke wechselt ihre Richtung, ebenso wie bei einem an eine Gleichstromquelle angeschlossen gewesenen Kondensator die Richtung des Entladestromes der Richtung des Ladestromes entgegengesetzt ist. Der Wert der Kondensatorspannung fällt ab und erreicht bei maximaler Stromstärke ihren Nullwert. In diesem Zeitpunkte ist der Kondensator wieder in normalen Verhältnissen, er ist entladen und besitzt wieder die volle Fähigkeit, Strommenge aufzunehmen.

In der III. Viertelperiode erfolgt eine abermalige Ladung und in IV eine Entladung des Kondensators.

Diese Verhältnisse können auch mit Hilfe von Vektoren dargestellt werden. Aus Fig. 47 ersehen wir, daß die Kondensatorspannung e_c der Stromstärke i in der Phase um eine Viertelperiode nacheilt. Auf Vektore bezogen, bedeutet dies soviel, daß die Vektoren der Stromstärke und der Kondensatorspannung aufeinander senkrecht stehen, und zwar eilt der Vektor der letzteren dem Vektor des ersteren um 90^0 nach.

Wie groß ist e_c? Wenn wir die Widerstände der Zuleitungen vernachlässigen, dann entsteht durch die Lade- und Entladeströme kein Ohmscher Spannungsverlust und e_c ist mit der Spannung der Stromquelle gleich.

Können die in der Leitung entstehenden Spannungsverluste nicht vernachlässigt werden, dann besteht diese Gleichheit nicht mehr, sondern ist die Spannung der Stromquelle als die Resultante der Kondensatorspannung und der Spannungsverluste anzusehen. Natürlich dürfen auch hier keine

Digitized by Google

algebraische Summationen vorgenommen werden, denn die Komponenten unterscheiden sich voneinander nicht nur in ihren Werten, sondern auch in ihren Phasen.

Wir stehen jetzt mit einem, der Selbstinduktion analogen Falle gegenüber, mit dem Unterschiede, daß während der Vektor der Spannung zum Kompensieren der gegenelektromotorischen Kraft der Selbstinduktion der Stromstärke um 90^0 voreilte, jetzt der Vektor der Kondensatorspannung dem Vektor der Stromstärke um 90^0 nacheilt.

Wollen wir die nötige Größe der elektromotorischen Kraft der Stromquelle bestimmen, um in dem Kondensatorkreise eine bestimmte Stromstärke hervorbringen zu können, dann verfährt man in derselben Weise, wie bei Stromkreisen mit Induktionsspulen.

In Fig. 48 ist $\overline{OB} = i_t$ der Vektor der Stromstärke. Die Kondensatorspannung eilt um eine Viertelperiode der Stromstärke voraus, folglich muß sein Vektor $\overline{OC} = e_c$ sein. Die Drehrichtung der Vektore ist durch einen Pfeil angegeben. Will man in diesem Stromkreise, welcher nur einen Kondensator nebst Zuleitungen besitzt, die Stromstärke i_t hervorrufen, dann muß zunächst die e_c Spannung kompensiert werden. Man muß demnach eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Spannung $\overline{OD} = -e_c$ wirken lassen. $\overline{OD}$ ist eine Komponente der zu bestimmenden elektromotorischen Kraft der Stromquelle.

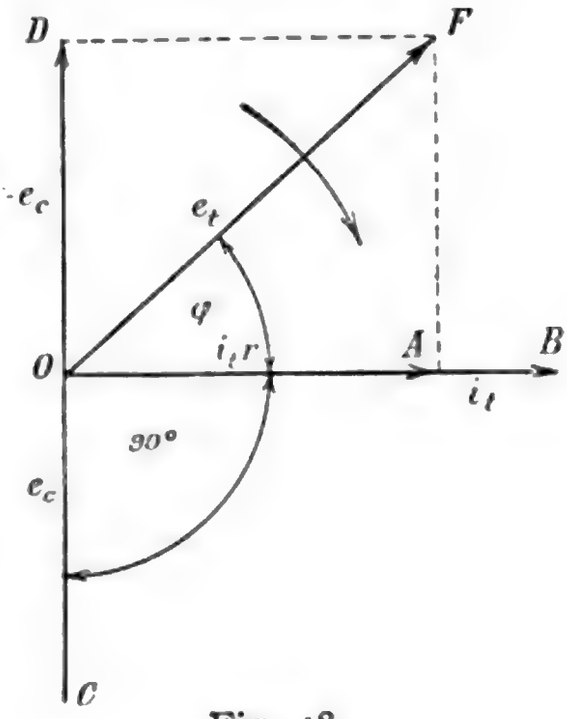


Fig. 48.

Die zweite Komponente ergibt sich aus dem Ohmschen Verluste in den Zuleitungen. Ist der Gesamtwiderstand des Stromkreises r und fließt in demselben die Stromstärke i_t, dann entsteht der Ohmsche Spannungsverlust $i_t r$, welcher mit der Stromstärke in Phase ist, da bei $i_t = 0$ und $i_t = max$, auch $i_t r$ Null, beziehungsweise Maximum wird. Die Vektoren von i_t und $i_t r$ fallen also zusammen. In unserem Falle ist $OA = i_t r$.

Die elektromotorische Kraft der Stromquelle ergibt sich nun als die Resultante von $-e_c$ und $i_t r$. Ihre Größe ist e_t und ihr Vektor ist dem Vektor der Stromstärke gegenüber phasenverspätet. Der Phasenverschiebungswinkel ist φ. Hieraus ersieht man, daß bei einem Kondensator die Verhältnisse entgegengesetzt sind, als bei einer Induktionsspule, denn während letztere eine Phasenvoreilung der elektromotorischen Kraft der Stromstärke gegenüber veranlaßte, verursacht die erstere eine Phasenverspätung zwischen diesen beiden Wechselgrößen.

Es wäre nun der Wert der Kondensatorspannung zu berechnen.

Wenn ein Kondensator an eine Gleichstromquelle angeschlossen wird, dann nimmt er eine gewisse Elektrizitätsmenge auf. Ist diese Elektrizitätsmenge Q, die elektromotorische Kraft der Stromquelle e und die Kapazität des Kondensators c, dann wird

$$Q = c\,e$$

sein.

Aus dieser Gleichung folgt, daß:

$$c = \frac{Q}{e}$$

d. h. die Kapazität des Kondensators ist jene Elektrizitätsmenge, die der Einheit der Spannung entspricht, oder jene Elektrizitätsmenge, welche

Digitized by Google

zwischen den Belegen des Kondensators die Einheit der Potentialdifferenz hervorruft.

Die Kapazität eines Kondensators hängt von der Größe der gegenüberstehenden Flächen, von der geometrischen Form derselben und von der Dicke und Natur des Dielektrikums ab und kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$c = k \frac{F}{4 \pi d}$$

wo k die Dielektrizitätskonstante des Isolators, F die Fläche der Belege und d die Dicke des Isolators bedeuten. Ist d und F in *cm*, beziehungsweise cm^2 gemessen, dann erhält man c in CGS Einheiten.

k ist bei den verschiedenen Materialien verschieden. In folgender Tabelle sind einige ihrer Werte zusammengestellt:

Luft	$k = 1$	Ozokerit	$k = 2$
Paraffin	$k = 1{,}96 \sim 2{,}32$	Ebonit	$k = 2{,}3 \sim 3{,}15$
Petroleum	$k = 2$	Schwefel	$k = 3{,}84$
Kolophonium	$k = 2{,}55$.	Glimmer	$k = 4{,}5 \sim 5$,

Die Dielektrizitätskonstante ist jene Zahl, welche angibt, um wie viel mal mehr Elektrizitätsmenge ein Kondensator aufnehmen kann im Verhältnis zu jener Elektrizitätsmenge, welche er aufnimmt, wenn unter sonst gleichen Umständen der Isolator Luft ist. So bedeutet z. B. bei Glimmer $k = 4{,}5 \sim 5$ soviel, daß ein Kondensator mit Glimmerdielektrikum $4{,}5 \sim 5$ mal mehr Elektrizitätsmenge aufnehmen kann, als wenn das Dielektrikum Luft wäre.

Nimmt ein Kondensator während des Zeitraumes dt die Elektrizitätsmenge da an, dann wächst seine Klemmenspannung um de und wird in diesem Falle:

$$da = c\,de$$

Digitized by Google

mit dt dividiert:

$$\frac{da}{dt} = c\frac{de}{dt}.$$

$\frac{da}{dt}$ ist die Elektrizitätsmenge, welche in der Zeiteinheit durch den Leiter fließt, also die Stromstärke i. Es wird daher, wenn wir noch sinusförmige Veränderung der Spannung voraussetzen, d. h. wenn

$$e = E_{max} \sin \omega t$$

$$i = c\frac{d(E_{max} \sin \omega t)}{dt}$$

sein. Nachdem aber:

$$\frac{d}{dt}(E_{max} \sin \omega t) = E_{max}\, \omega \cos \omega t$$

ist

$$i = c\, E_{max}\, \omega \cos \omega t.$$

E_{max} ist der maximale Wert der Spannung der Stromquelle. Wenn die Leitung keinen Widerstand hätte, dann wäre diese Spannung mit der Kondensatorspannung gleich groß, denn dann würden keine Spannungsverluste in der Leitung auftreten. Gewöhnlich ist der Widerstand des Leiterkreises so klein, daß der Ohmsche Spannungsabfall vernachlässigt werden kann, und in diesem Falle ist $e = e_c$, wobei e_c die Kondensatorspannung bezeichnet.

In diesem Falle wird also

$$i = c\, E_c\, \omega \cos \omega t$$

oder der Maximalwert

$$J_{max} = c\, E_c\, \omega.$$

Diese Gleichung kann dazu benutzt werden, daß man bei gegebener Stromstärke und Kapazität

Digitized by Google

den Wert der Kondensatorspannung berechnet, denn es wird aus obiger Gleichung

$$E_c = \frac{J_{max}}{c\,\omega}.$$

Diese Gleichung hat auch für effektive Werte Giltigkeit, man muß nur mit $\sqrt{2}$ dividieren, vorausgesetzt, daß die Änderung des Stromes und der Spannung nach dem Sinusgesetze erfolgt.

Für effektive Werte ist unsere Gleichung also folgende:

$$\frac{E_c}{\sqrt{2}} = \frac{J_{max}}{\sqrt{2}\,c\,\omega}$$

oder

$$e_{eff} = \frac{i_{eff}}{c\,\omega}.$$

ω bedeutet hierbei die Winkelgeschwindigkeit des Vektors. Ist $\sim$ die Periodenzahl des Wechselstromes und T die für eine volle Periode nötige Zeit, dann ist:

$$\omega = 2\,\pi \sim = \frac{2\,\pi}{T}.$$

Die Kapazität eines Kondensators kann bestimmt werden, wenn man die Periodenzahl des Wechselstromes kennt und die Stromstärke und die Spannung mißt. Es wird dann:

$$c = \frac{i_{eff}}{e_{eff}\,\omega}.$$

Wird i_{eff} in Ampère, e_{eff} in Volt gemessen, dann bekommt man c in der praktischen Einheit der Kapazität, in Farad. Da jedoch das Farad eine große Einheit ist, hat man das Mikrofarad angenommen, welches den millionstel Teil des Farad bildet:

$$1 \text{ Mikrofarad} = \frac{1}{10^6} \text{ Farad} = 10^{-6} \text{ Farad}.$$

Digitized by Google

Nachdem

$$1 \text{ Ampère} = 10^{-1} \; C\,G\,S \text{ Einheiten}$$

und

$$1 \text{ Volt} = 10^{8} \; \text{„} \; \text{„}$$

so wird laut der letzten Gleichung auf Seite 145

$$1 \text{ Farad} = 10^{-9} \; C\,G\,S \text{ Einheiten}$$

oder

$$1 \text{ Mikrofarad} = 10^{-15} \; \text{„} \; \text{„}$$

Die Größe des verursachten Phasenverschiebungswinkels kann aus Fig. 48 bestimmt werden, und zwar wird:

$$\cos \varphi = \frac{i_t r}{e_t} = \frac{e_n}{e_t}$$

oder

$$tg \varphi = \frac{e_c}{e_n} = \frac{i_t}{c \omega i_t r} = \frac{1}{c \omega r}$$

wo r den Ohmschen Widerstand des Leiterkreises bedeutet.

Hat der Stromkreis keinen Widerstand, dann wäre $r = 0$ und

$$tg \varphi = \infty$$

d. h. $\varphi = 90^0$. In diesem Falle wäre der Vektor der Spannung hinter dem Vektor der Stromstärke um eine Viertelperiode phasenverspätet. Dies ist natürlich nie zu erreichen, denn jeder Leiter besitzt wenn auch noch so kleinen Ohmschen Widerstand.

Zwischen der Gesamtspannung, dem Ohmschen Spannungsabfall und der Kondensatorspannung ist demnach der Zusammenhang derselbe, wie bei den Induktionsspulen zwischen den Komponent- und der resultierenden Spannungen. Der Zusammenhang wird durch ein rechtwinkeliges Dreieck gegeben, dessen Hypotenuse die Gesamtspannung,

Digitized by Google

eine Kathete die Kondensatorspannung, die andere dagegen der Ohmsche Spannungsverlust ist.

Dieses Dreieck ist in Fig. 48 OAF, aus welchem folgt, daß

$$e_l = \sqrt{e_n^2 + e_c^2}$$

ist.

Will man daher für einen gegebenen Phasenwinkel die entsprechenden Spannungskomponenten haben, dann verfährt man wie bei Fig. 40, d. h. man zieht mit dem Halbmesser $\frac{e_l}{2}$ einen Halbkreis, trägt den Winkel φ auf und bestimmt den Schnittpunkt der zu φ gehörigen Linie und des Halbkreises. Dieser Punkt und die zwei Endpunkte des Halbkreises geben das gesuchte Dreieck, in welchem jene Kathete mit dem Ohmschen Spannungsabfall proportional ist, welcher mit der Gesamtspannung den Phasenverschiebungswinkel φ bildet. Man muß natürlich bei der Bestimmung der Drehrichtung der Vektoren darauf achten, daß bei Kondensatoren die Stromstärke der Spannung voreilt.

Kapazität und Ohmscher Widerstand in Hintereinanderschaltung.

Bei der elektrischen Licht- und Kraftverteilung mit Wechselströmen bedient man sich konzentrischer Kabel, welche so verfertigt sind, daß sie keine Selbstinduktion haben. Diese Kabel besitzen in ihrer Achse eine, aus einen oder mehreren Kupferdrähten bestehende Seele, welche mit genügend dicker Isolationsmasse umgeben wird und welchen man zur Hinleitung des Stromes benutzt. Zur Rückleitung dient ein, ebenfalls aus mehreren Drähten zusammengeseilter Leiter, welcher die obenerwähnte Isolationsmasse umgibt, also eine Zylinderfläche bildet, deren Achse mit der Achse

Digitized by Google

des Kabels zusammenfällt. Auf diesen zweiten Leiter kommt wieder eine Schichte Isolation, das ganze wird dann noch mit Stahlbändern oder Drähten umflochten, damit äußere mechanische Einflüsse das Kabel nicht beschädigen können.

Ein solches Kabel ist im Querschnitt aus der Fig. 49 ersichtlich. Die weißgelassenen Teile sind die Kupferdrähte, welche voneinander durch eine isolierende Schicht getrennt sind. Die äußere Leitung ist außerdem noch mit einer Isolation umkleidet, welche mit doppelter Schutzhülse umgeben wird.

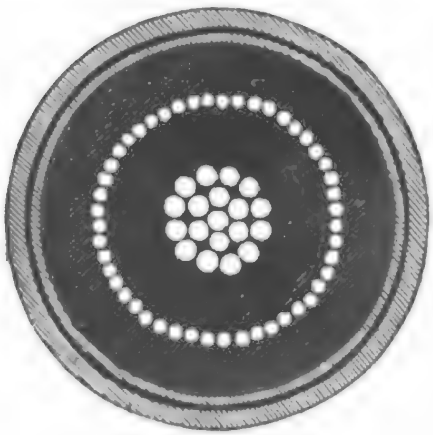


Fig. 49.

Bei Kabeln stehen also zwei, voneinander isolierte Metallflächen gegenüber, ein Kabel bildet demnach einen Kondensator. Nachdem die Kapazität eines Kondensators von der Größe der einander gegenüberstehenden Metallflächen abhängt, ist die Kapazität eines Kabels um so größer, je länger es ist. Natürlich spielt auch die Dicke der zwischen den Leitern liegenden Isolation eine Rolle, und die Kapazität ist unter sonst gleichen Umständen mit dieser Dicke umgekehrt proportional.

Jede Leitung besitzt Ohmschen Widerstand, und nachdem das Kabel so verfertigt wird, daß darin keine Selbstinduktionserscheinung auftritt, haben hier wir mit einem Fall zu tun, bei welchem Kapazität und Ohmscher Widerstand miteinander in Serie geschaltet sind. Man kann nämlich bei der Untersuchung der Verhältnisse dieses Falles das Kabel widerstandslos betrachten, dafür aber mit ihm einen Ohmschen Widerstand in Serie schalten, dessen Größe gleich mit dem Ohmschen Widerstande des Kabels ist.

Digitized by Google

Unsere Aufgabe besteht nun darin, den Zusammenhang zwischen den elektrischen Größen für diesen Fall zu ermitteln.

Wir wissen aus dem Vorhergesagten, daß ein Kondensator, mit einer Wechselstromquelle verbunden, im Stromkreise eine elektrische Strömung hervorruft, welche von den Lade- und Entladeströmen herrührt. Je größer die Kapazität des Kondensators, um so stärker sind diese Ströme.

Die Schaltungsdisposition ist aus Fig. 50 ersichtlich. W ist die Wechselstromquelle, R der

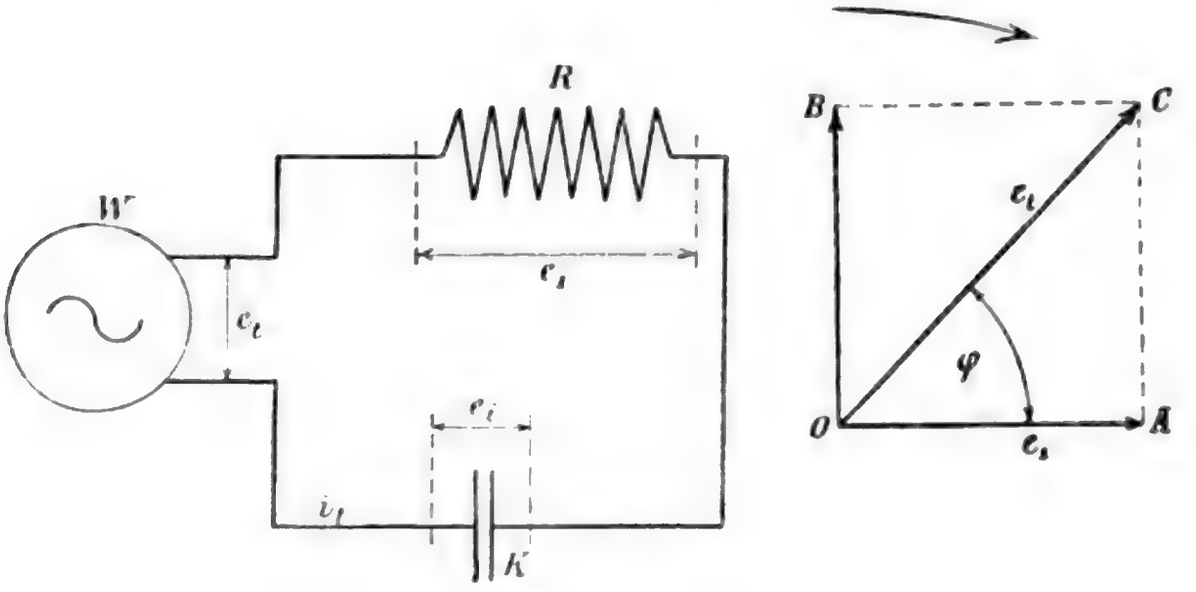


Fig. 50.

Ohmsche Widerstand, K der Kondensator mit der Kapazität c. Die Spannung an den Klemmen der Wechselstromquelle sei e_t, jene zwischen den Enden des Ohmschen Widerstandes und des Kondensators e_1 beziehungsweise e_2. Die durch die Leiter fließende Stromstärke ist i_t.

Wenn ein Strom durch einen Ohmschen Widerstand fließt, dann entsteht ein Spannungsverlust, dessen Größe von der des Widerstandes abhängt. In unserem Falle ist der Gesamtwiderstand in R konzentriert, folglich wird der gesamte Ohmsche

Digitized by Google

Spannungsabfall $i_t R$ sein. Dies ist aber nichts anderes als die Spannungsdifferenz e_1, d. h.

$$e_1 = i_t R.$$

e_2 ist die Potentialdifferenz an den Klemmen des Kondensators. Ist die Periodenzahl des Wechselstromes gegeben, dann kann e_2 bestimmt werden, und zwar wird nach Seite 145:

$$e_2 = \frac{i_t}{c\, 2\pi \sim} = \frac{i_t}{c\, \omega}.$$

e_1 und e_2 sind zwei Spannungen, welche aus der Spannung e_t entstehen. Es darf aber hier keine algebraische Summation vorgenommen werden, denn wie wir bald sehen werden, sind e_1 und e_2 in ihren Phasen verschieden.

Die Spannungsdifferenz e_1 ist Ohmscher Spannungsabfall, sie ist also mit der Stromstärke in Phase. e_2 ist dagegen die die gegenelektromotorische Kraft der Kapazität kompensierende Spannung, welche mit dem Strome eine Phasendifferenz im Werte einer Viertelperiode hat. e_1 und e_2 stehen demnach im Vektordiagramm senkrecht aufeinander und die resultierende Spannung, in unserem Falle also e_t, wird bestimmt, wenn man die Endpunkte der Vektore e_1 und e_2 miteinander verbindet.

Bezeichnet im Vektordiagramm $\overline{OA} = e_1$ und $\overline{OB} = e_2$, dann ist die Resultante $\overline{OC} = e_t$, da $\overline{AC} = \overline{OB} = e_2$ ist. e_2 bedeutet hier nicht die gegenelektromotorische Kraft des Kondensators, sie ist vielmehr eine Spannungskomponente der Gesamtspannung, welche nötig ist, um die Kondensatorwirkung, welche als ein Widerstand sich verhält, in Gleichgewicht halten und die Stromstärke i_t hervorbringen zu können.

Die Stromstärke eilt der Spannung in der Phase um den Winkel φ voraus.

Digitized by Google

Man kann auch hier die Stromstärke in zwei Komponenten zerlegen, von welchen eine in die Richtung der Spannung e_t, die andere in eine darauf senkrechte Richtung fällt. Sind diese Komponenten i^n, beziehungsweise i_o, dann ist

$$i_t = \sqrt{i_n^2 + i_o^2}.$$

i_n ist wieder die Arbeitskomponente der Stromstärke, da das Produkt $i_n e_t$ die geleistete effektive Arbeit gibt. Diese Komponente wird die Wattkomponente genannt.

Dagegen ist i_o senkrecht auf e_t, weshalb $e_t i_o = \emptyset$ wird. Das besagt, daß die Komponente i_o keine Arbeit leistet, sie ist nur zur Hervorrufung des elektrostatischen Feldes im Kondensator nötig. Dieses Feld entsteht und verschwindet, ebenso wie das magnetische Feld und verursacht den wattlosen i_o Lade- und Entladestrom. Bei der Einschaltung des Kondensators in den Stromkreis hat man eine gewisse Energiemenge nötig, um das elektrostatische Feld hervorrufen zu können; diese Energie verliert man jedoch nicht, sondern sie wird beim Ausschalten in die Stromquelle zurückgeleitet.

Aus diesen Ausführungen ersieht man, daß der Kondensator dieselben Veränderungen im Stromkreise hervorruft wie eine Induktionsspule. Nachdem aber die gegenelektromotorische Kraft des Kondensators jener der Selbstinduktion entgegengesetzt gerichtet ist, wird auch die Wirkung des Kondensators im entgegengesetzten Sinne erfolgen, als jene der Induktionsspule.

Aus Fig. 50 folgt, daß

$$e_t = \sqrt{e_1^2 + e^2{}_2}.$$

Nachdem

$$e_1 = i_t R \quad \text{und} \quad e_2 = \frac{i_t}{c\,\omega}$$

Digitized by Google

wird

$$e_t = \sqrt{i_t^2 R^2 + \frac{i_t^2}{c^2 \omega^2}}$$

oder hieraus

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{c^2 \omega^2}}}.$$

Diese letzte Gleichung gibt das Ohmsche Gesetz für solche Stromkreise, welche außer Ohmschem Widerstande auch eine Kapazität besitzen.

Beispiel.

In einem Stromkreise ist ein Ohmscher Widerstand und ein Kondensator in Serie geschaltet. Der Wechselstrom hat eine Periodenzahl $\sim = 50$, der Ohmsche Widerstand ist $R = 10\,\Omega$, die Kapazität des Kondensators beträgt $c = 20$ Mikrofarad, die Spannung der Stromquelle ist $e_t = 100$ Volt. Wie groß ist die Stromstärke in Ampère, welche in diesem Stromkreise fließt?

Nach der letzten Gleichung ist

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{c^2 \omega^2}}}.$$

Hier muß die Kapazität in Farad substituiert werden, also wird

$$c = 20 \text{ Mikrofarad} = 20 \,.\, 10^{-6} \text{ Farad}.$$

Weiters:

$$\omega = 2\,\pi \sim = 2\,\pi \,.\, 50$$

$$\omega = 314$$

also ist

Digitized by Google

$$i_t = \frac{100}{\sqrt{10^2 + \left(\frac{1}{20 \cdot 10^{-6} \cdot 314}\right)^2}} = \frac{100}{\sqrt{100 + \left(\frac{10^6}{20 \cdot 314}\right)^2}}$$

und hieraus wird

$$i_t = 0{,}633 \text{ Ampère.}$$

Wie groß ist die Watt- und die wattlose Komponente des Wechselstromes?

Zur Lösung dieser Aufgabe müssen wir den Phasenverschiebungswinkel kennen.

Aus Fig. 50 ist der Cosinus dieses Winkels:

$$\cos \varphi = \frac{e_1}{e_t} = \frac{i_t R}{e_t}.$$

In unserem Falle ist $R = 10\ \Omega$, folglich wird:

$$e_1 = 10 \cdot 0{,}633 = 6{,}33 \text{ Volt}$$

und

$$\cos \varphi = \frac{6{,}33}{100} = 0{,}0633$$

sein.

Die Wattkomponente des Stromes fällt in die Richtung der Gesamtspannung e_t, folglich wird

$$i_n = i_t \cos \varphi = 0{,}633 \times 0{,}0633$$

oder

$$i_n = 0{,}0401 \text{ Ampère}$$

sein.

Die wattlose Komponente ist hiermit auch bestimmt, denn i_t, i_n und i_o bilden ein rechtwinkeliges Dreieck, bei welchem die Kathete i_o:

$$i_o = \sqrt{i_t^2 - i_n^2}$$

ist. Die gefundenen Werte substituiert, wird

$$i_o = \sqrt{0{,}633^2 - 0{,}0401^2}$$

d. h.

$$i_o = 0{,}63 \text{ Ampère.}$$

Man sieht, daß bei diesen Verhältnissen der wattlose Strom bald so groß, als der Gesamtstrom ist.

Es ist die Leistung des Wechselstromes zu bestimmen.

Bekanntlich ist bei gegebener Phasenverschiebung die Leistung des Wechselstromes

$$W = e_t i_t \cos \varphi.$$

In unserem Falle ist:

$$W = 100 \,.\, 0{,}633 \,.\, 0{,}0633$$

d. h.

$$W = 4{,}01 \text{ Watt.}$$

Zu demselben Ergebnis gelangt man, wenn man die Wattkomponente in Betracht zieht:

$$W = e_t i_n$$

oder

$$W = 100 \,.\, 0{,}0401 = 4{,}01 \text{ Watt}$$

was sich mit obigem vollkommen deckt.

Wie groß müßte die Kapazität des Kondensators sein, um bei denselben Verhältnissen $i_t = 1$ Ampère im Stromkreise hervorbringen zu können?

Zu diesem Behufe bestimmt man aus der Gleichung

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{c^2 \omega^2}}}$$

den Wert c und setzt dann $i_t = 1$. Es wird

$$c = \frac{i_t}{\omega \sqrt{e_t^2 - R^2 i_t^2}}.$$

Digitized by Google

Die gegebenen Werte substituiert:

$$c = \frac{1}{314\sqrt{100^2 - 10^2 \cdot 1^2}}.$$

Hieraus bekommt man, daß die gesuchte Kapazität

$$c = 32{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ Farad}$$

ist.

In diesem Falle ist der Cosinus des Phasenverschiebungswinkels

$$\cos\varphi = \frac{e_1}{e_t} = \frac{i_t R}{e_t} = \frac{1 \cdot 10}{100}$$

$$\cos\varphi = 0{,}1.$$

Man kann in Stromkreisen, welche Kondensatoren enthalten, nie erreichen, daß die Gesamtspannung zur Stromstärke in der Phase um eine Viertelperiode zurückbleibt, denn das würde soviel bedeuten, daß die ganze Spannung mit der gegenelektromotorischen Kraft der Kapazität gleich ist. Dies ist auch schon deshalb ausgeschlossen, weil neben den immer auftretenden Ohmschen Spannungsverlusten auch andere, mit letzteren in Phase sich befindlichen Spannungsverluste auftreten, welche der der dielektrischen Hysteresis entsprechenden Arbeit proportional sind. Bei den Kondensatoren findet nämlich durch den Wechselstrom eine fortdauernde Umpolarisierung des Dielektrikums statt, ebenso wie bei der Induktionsspule des Eisenkernes. Bei letzterem entstand ein magnetisches, bei ersterem entsteht ein elektrostatisches Feld. Die der dielektrischen Hysteresis entsprechende Arbeit wird in Wärme umgewandelt, welche der umgebenden Luft durch Leitung und Strahlung abgegeben wird, welche also eine verlorene Arbeit darstellt. Dieser Arbeitsmenge entspricht ein Spannungsabfall, dessen

Digitized by Google

Vektor in die Richtung des Stromvektors fällt. Die gesamten Spannungsverluste und die die gegenelektromotorische Kraft der Kapazität kompensierende Spannung ergeben dann als Resultierende die Gesamtspannung des Stromkreises. Nachdem dies nie mit der letzterwähnten Spannungskomponente zusammenfallen kann, sondern immer eine Diagonale eines Dreieckes bildet, kann der Phasenverschiebungswinkel φ nie den Wert von 90^0 erreichen.

Mehrere Ohmsche Widerstände und Kondensatoren in Hintereinanderschaltung.

In Fig. 51 sind die Widerstände r_1, r_2, r_3 mit den Kapazitäten c_1, c_2, c_3 abwechselnd in Serie geschaltet. Die Stromquelle liefert bei der Spannung e_t die Stromstärke i_t, welche für den ganzen Stromkreis dieselbe ist, da alle Konsumenten nacheinander geschaltet sind. Die Spannungsdifferenzen zwischen den einzelnen Endpunkten der Konsumenten seien e_1, e_{c1}, e_2, e_{c2}, e_3 und e_{c3}, wie auch aus der Figur ersichtlich. Die Periodenzahl des Wechselstromes ist ∞.

Aufgabe ist, den Zusammenhang bestimmen, welcher zwischen diesen Spannungen und der Gesamtspannung e_t besteht.

Wir haben also aus sechs Komponentspannungen eine resultierende Spannung zu ermitteln. Nachdem diese Teilspannungen die verschiedensten Phasen haben, müssen wir eine geometrische Summation anwenden und zu diesem Zwecke konstruieren wir für die einzelnen Fälle Vektordiagramme, mit deren Hilfe dann e_t leicht zu bestimmen ist.

Diese Schaltungsdisposition ist eigentlich nur das Dreifache des früher behandelten. Wir können also das Problem in drei Teilen lösen.

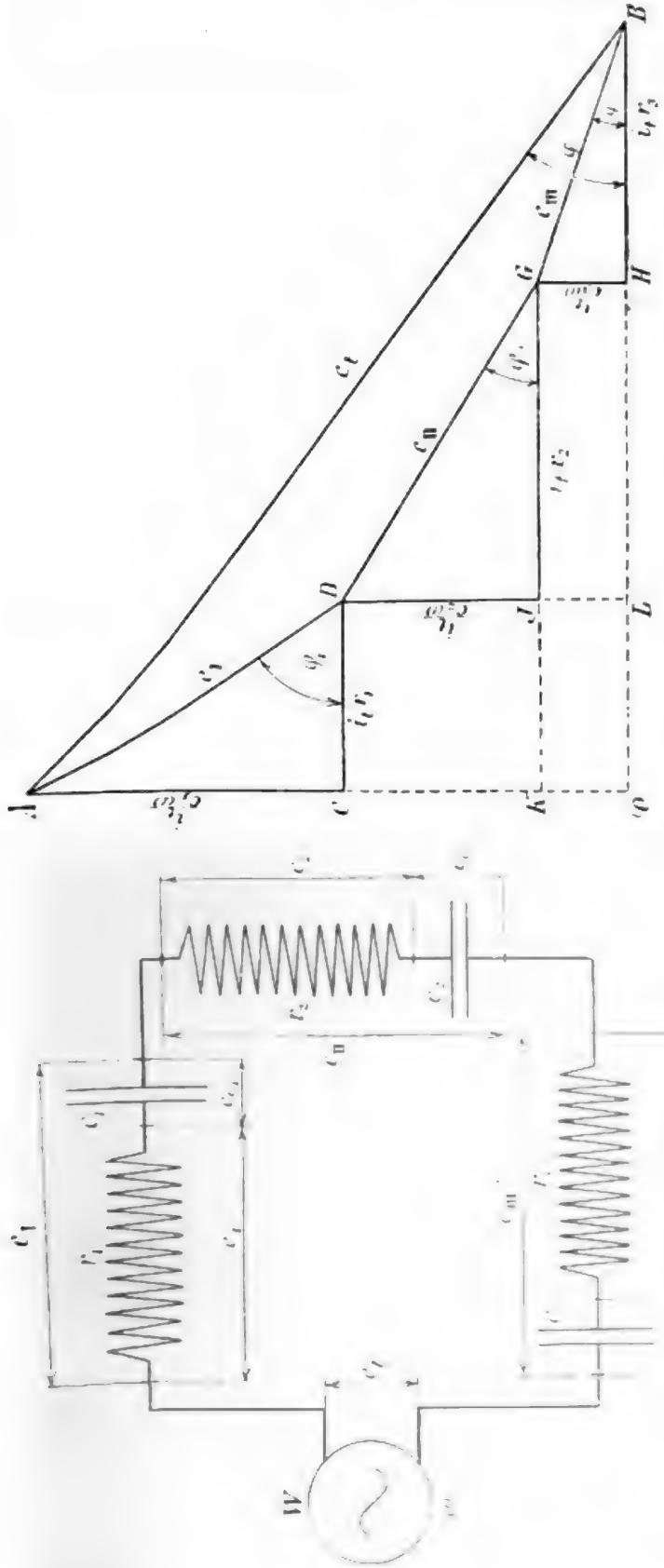


Fig. 51.

Zuerst untersuchen wir die Spannungsverhältnisse für die erste Gruppe, also für den in Serie geschalteten Widerstand r_1 und der Kapazität c_1. Die Stromstärke i_t ist überall dieselbe.

e_1 und e_{c1} sind zwei Spannungskomponenten, welche die Spannung e_I bestimmen. e_1 ist der Ohmsche Spannungsverlust im Widerstande r_1, folglich ist sein Wert:

$$e_1 = i_t r_1.$$

Die zweite Komponente ist jene Spannung, welche zur Kompensierung der gegenelektromotorischen Kraft des Kondensators c_1 nötig ist. Diese kann nach den bisherigen Erörterungen folgendermaßen ausgedrückt werden

$$e_{c1} = \frac{i_t}{c_1 \omega}$$

wobei bei der gegebenen Periodenzahl:

$$\omega = 2 \pi \infty$$

ist.

Was die Richtungen der Vektoren e_1 und e_{c1} betrifft, wissen wir bereits, daß diese aufeinander senkrecht stehen, wählen wir daher einen Spannungsmaßstab, dann können wir die zwei Katheten $\overline{CD}$ und $\overline{AC}$ des Dreieckes ACD bestimmen. Hierbei ist:

$$\overline{CD} = e_1 = i_t r_1$$

und

$$\overline{AC} = e_{c1} = \frac{i_t}{c_1 \omega}$$

$\overline{AD}$ ist die Hypotenuse des Dreieckes, d. h. dies ist die resultierende Spannungsdifferenz e_I. Ihre Größe ist durch die Gleichung

$$e_I = \sqrt{i_t^2 r_1^2 + \frac{i_t^2}{c_1^2 \omega^2}} = i_t \sqrt{r_1^2 + \frac{1}{c_1^2 \omega^2}}$$

bestimmt.

Digitized by Google

e_I ist zum Strome i_t in der Phase um den Winkel φ_1 verspätet, da der Vektor des letzteren mit dem Vektor des Ohmschen Spannungsabfalls zusammenfällt.

Das bisher Gesagte gilt auch für die Widerstände r_2, r_3 und die Kapazitäten c_2, c_3. Die Spannungskomponenten $i_t r_2$ und $\frac{i_t}{c_2 \omega}$ d. h. e_2 und e_{c2} bestimmen das Dreieck DFG, dessen Hypotenuse $\overline{DG} = e_{II}$ ist. Diese resultierende Spannung ist dem Strome i_t um den Winkel φ_2 phasenverspätet.

Die dritte Gruppe betreffend, wird

$$e_3 = i_t r_3$$

und

$$e_{c3} = \frac{i_t}{c_3 \omega}$$

sein, und die Resultante

$$e_{III} = GB = i_t \sqrt{r_3^2 + \frac{1}{c_3^2 \omega^2}}$$

In analoger Weise ist:

$$e_{II} = DG = i_t \sqrt{r_2^2 + \frac{1}{c_2^2 \omega^2}}$$

Der Phasenunterschied zwischen e_{III} und i_t ist durch φ_3 gegeben.

Die Cosinuse der drei Phasenwinkel können aus den Vektordiagrammen bestimmt werden, und zwar

$$\cos \varphi_1 = \frac{\overline{DC}}{\overline{AD}} = \frac{i_t r_1}{e_I} = \frac{i_t r_1}{i_t \sqrt{r_1^2 + \frac{1}{c_1^2 \omega^2}}} = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + \frac{1}{c_1^2 \omega^2}}}.$$

Ferner:

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + \frac{1}{c_2^2\,\omega^2}}}$$

und

$$\cos\varphi_3 = \frac{r_3}{\sqrt{r_3^2 + \frac{1}{c_3^2\omega^2}}}.$$

Es wäre noch übrig die Gesamtspannung e_t zu bestimmen. e_t ist die Resultante der Spannungen e_I, e_{II} und e_{III}. Nachdem $\overline{CK} = \overline{DF}$, $\overline{KO} = \overline{GH}$ und $\overline{OL} = \overline{CD}$, $\overline{LH} = \overline{FG}$, wird

$$e_t^2 = (\overline{AC} + \overline{CK} + \overline{KO})^2 + (\overline{OL} + \overline{LH} + \overline{HB})^2$$

oder

$$e_t^2 = \frac{i_t^2}{\omega^2}\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3}\right)^2 + i_t^2\left(r_1 + r_2 + r_3\right)^2$$

und hieraus:

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{(r_1 + r_2 + r_3)^2 + \frac{1}{\omega^2}\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3}\right)^2}}.$$

Sind im allgemeinen die Ohmschen Widerstände r_1, r_2, . . ., r_n und die Kapazitäten c_1, c_2, . . ., c_n in Serie geschaltet, dann wird die allgemeinste Form des Ohmschen Gesetzes für solche Stromkreise

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{\sum_1^n (r_n)^2 + \frac{1}{\omega^2}\sum_1^n\left(\frac{1}{c_n}\right)^2}}$$

sein.

Der Cosinus des resultierenden Phasenwinkels zwischen der Spannung und der Stromstärke wird durch die Gleichung gegeben:

Digitized by Google

$$\cos\varphi = \frac{\overline{OB}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OL} + \overline{LH} + \overline{HB}}{\overline{AB}}$$

oder

$$\cos\varphi = \frac{i_t r_1 + i_t r_2 + i_t r_3}{e_t} = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{e_t}.$$

Für den allgemeinsten Fall wird

$$\cos\varphi = \frac{i_t (r_1 + r_2 + \ldots + r_n)}{e_t}$$

sein oder in anderer Form:

$$\cos\varphi = \frac{i_t (r_1 + r_2 \ldots + r_n)}{i_t \sqrt{(r_1 + r_2 + \ldots + r_n)^2 + \frac{1}{\omega_2}\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \ldots + \frac{1}{c_n}\right)^2}}.$$

Endlich:

$$\cos\varphi = \frac{\sum_1^n (r_n)}{\sqrt{\sum_1^n (r_n)^2 + \frac{1}{\omega^2}\sum_1^n \left(\frac{1}{c_n}\right)^2}}.$$

Induktionswiderstand und Kapazität mit Ohmschem Widerstande in Serie geschaltet.

Im Stromkreise Fig. 52 ist der Induktionswiderstand A mit dem Kondensator C in Serie geschaltet. Der Induktionswiderstand hat einen gewissen Ohmschen Widerstand, dieser und der Gesamtwiderstand zusammen bilden jenen Ohmschen Widerstand, welcher mit der Kapazität und dem Induktionswiderstande in Hintereinanderschaltung ist. Die Stromquelle liefere einen Strom von der Periodenzahl ∞, der Spannung e_t und der Stromstärke i_t. Die Kapazität sei c, der Selbstinduktionskoefficient l, der gesamte Ohmsche Widerstand r. Der Spannungsabfall längs der Induktionsspule

Digitized by Google

ist e_1, jener zwischen den Klemmen des Kondensators e_2.

e_1 ist die resultierende Spannung aus dem Ohmschen Spannungsverluste e_n und der die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion kompensierenden Spannung e_s. Diese sind bekanntlich in ihren Phasen um eine Viertelperiode gegeneinander verschoben und zwar eilt e_s der Spannung e_n vor. Im Vektordiagramm haben wir also zwei

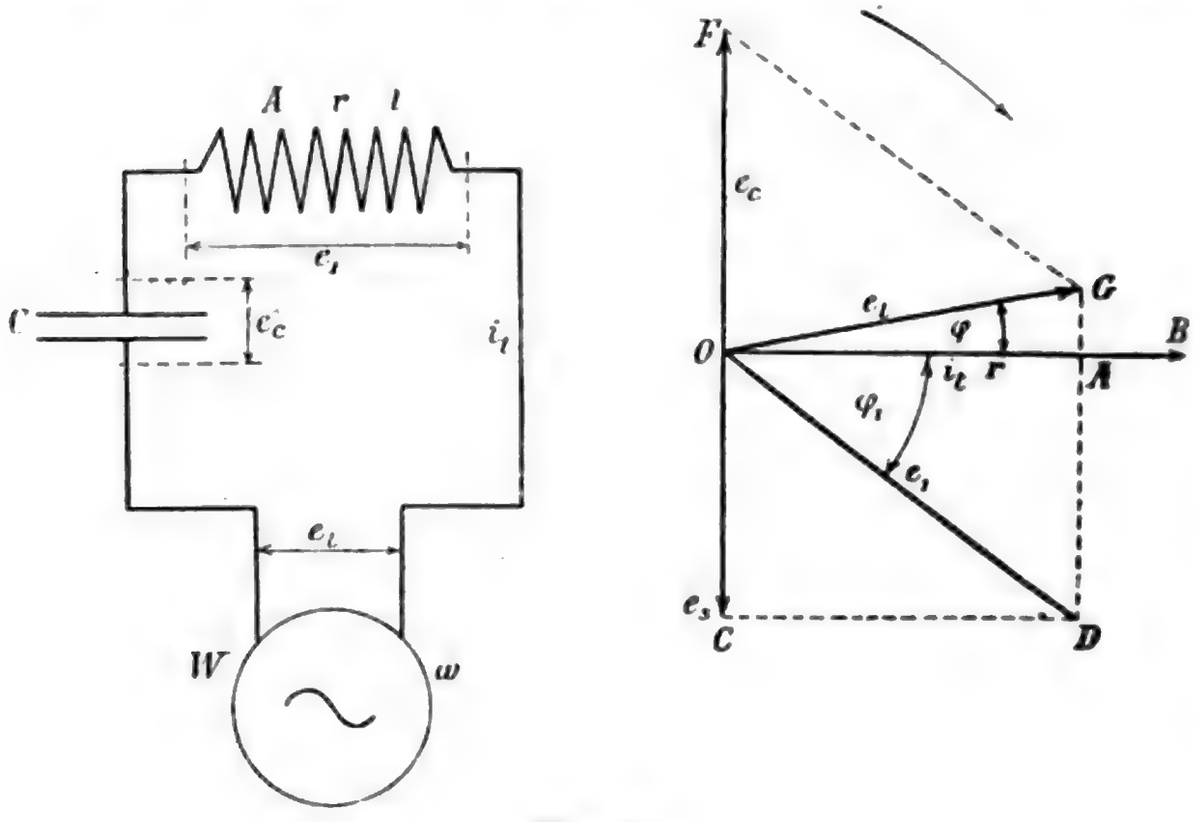


Fig. 52.

aufeinander senkrechte Vektoren, $\overline{OA}$ und $\overline{OC}$, welche die Spannungsdifferenz $\overline{OD}$, als die Diagonale des Parallelogrammes $OADC$ bestimmen.

Bedeutet $\overline{OB}$ den Vektor der Stromstärke i_t, dann fällt der Vektor des Spannungsabfalls $i_t r = e_n$ mit diesem zusammen. Die Spannung e_1 eilt demnach der Stromstärke i_t in der Phase um den Winkel φ_1 voraus.

Zur Kapazität übergehend, weiß man, daß die gegenelektromotorische Kraft e_c derselben der

Digitized by Google

Stromstärke um eine Viertelperiode nacheilt. Der dem entsprechende Vektor ist $\overline{OF}$. Nachdem die Gesamtspannung e_t der Stromquelle aus den Teilspannungen e_n, e_s und e_c oder e_1 und e_c sich ergibt, muß man die Resultierende der Vektorgrößen $\overline{OD} = e_1$ und $\overline{OF} = e_c$ bilden. Diese wird aus dem Rhomboid $OFGD$ bestimmt und zwar wird $\overline{OG} = e_t$. In unserem Falle ist e_t vom Strome um den Winkel φ phasenverspätet.

Aus dieser graphischen Behandlung ist ersichtlich, daß die Selbstinduktion und die Kapazität entgegengesetzte Wirkungen haben. Verursacht in einem Stromkreise die Selbstinduktion zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung, dann kann diese durch Dazuschalten einer Kapazität vermindert werden, ja man kann die Selbstinduktion und die Kapazität so wählen, daß sie gleich große, jedoch entgegengesetzt gerichtete Phasenverschiebungen hervorrufen, wodurch die resultierende Phasenverschiebung Null wird. In einem solchen Wechselstromkreise gilt das Ohmsche Gesetz in derselben Form, wie beim Gleichstrome.

Die resultierende Phasenverschiebung kann naturgemäß nur dann Null werden, wenn e_c und e_s einander gleich sind. Bei Vektorgrößen darf man algebraische Summationen nur dann vornehmen, wenn zwischen ihnen der Phasenwinkel 0^0 oder 180^0 ist und dies ist gerade der Fall bei unserer Schaltungsdisposition. Es kommt nämlich nur eine der Differenz $(e_c - e_s)$ entsprechende Spannungskomponente in Betracht, welche mit e_n die Gesamtspannung e_t bestimmt. Wird $e_s = e_c$, dann ist $e_s - e_c = 0$ und

$$e_t = \overline{OG} = \overline{OA} = i_t r = e_n.$$

Sehen wir nun die rechnerische Bestimmung der verschiedenen, hier vorkommenden Größen.

Digitized by Google

e_t und i_t sind gegeben. Die Komponentspannungen sind zu berechnen und der zwischen ihnen und den Größen e_t und i_t bestehende Zusammenhang zu ermitteln.

Wenn l der Selbstinduktionskoeffizient und $\sim$ die Periodenzahl sind, dann wird

$$\omega = 2\pi \sim$$

und die kompensierende Spannung der Selbstinduktion

$$e_s = i_t l \omega.$$

Die resultierende Spannungsdifferenz e_1 ergibt sich aus dem rechtwinkeligen Dreieck OAD und zwar wird:

$$e_1^2 = \overline{OA}^2 + \overline{AD}^2 = i_t^2 r^2 + e_s^2 = e_n^2 + e_s^2$$

oder

$$e_1 = \sqrt{e_n^2 + e_s^2}$$

e_t ist die Resultante von e_1 und e_c. Nachdem aber OAG ein rechtwinkeliges Dreieck ist, wird

$$e_t^2 = \overline{OG}^2 = \overline{OA}^2 + \overline{GA}^2.$$

Weiters ist

$$\overline{GA} = \overline{GD} - \overline{AD} = \overline{OF} - \overline{AD}$$

oder

$$\overline{GA} = e_c - e_s.$$

Substituiert und die Wurzel gezogen, wird aus obiger Gleichung

$$e_t = \sqrt{e_n^2 + (e_c - e_s)^2}$$

In diesem Ausdrucke ist e_c die gegenelektromotorische Kraft der Kapazität kompensierende Spannung und zwar ist ihre Größe

$$e_c = \frac{i_t}{c\,\omega}.$$

Digitized by Google

Die verschiedenen Spannungswerte substituiert, bekommt man

$$e_t = \sqrt{i_t^2 r^2 + \left(\frac{i_t}{c\omega} - i_t l \omega\right)^2}$$

$$e_t = i_t \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{c\omega} - l\omega\right)^2}$$

Das ist das verallgemeinerte Ohmsche Gesetz für solche Stromkreise, welche Ohmschen Widerstand, Kapazität und Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung besitzen.

Die Gegenwirkung der Kapazität und der Selbstinduktion kommt auch in obiger Formel zum Ausdruck, indem zwischen den Klammern eine Differenz steht, deren Glieder sich aus diesen Größen ergeben. Bei geeigneter Wahl der Verhältnisse kann diese Differenz Null werden und dann ist:

$$e_t = i_t \sqrt{r^2} = i_t r.$$

Das gibt:

$$i_t = \frac{e_t}{r}$$

das einfache Ohmsche Gesetz, welches in Gleichstromkreisen Giltigkeit hat.

Der Cosinus des resultierenden Phasenverschiebungswinkels läßt sich folgendermaßen berechnen:

$$\cos\varphi = \frac{\overline{OA}}{\overline{OG}} = \frac{e_n}{e_t} = \frac{i_t r}{i_t \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{c\omega} - l\omega\right)^2}}$$

oder einfacher:

$$\cos\varphi = \frac{r}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{c\omega} - l\omega\right)^2}}.$$

Digitized by Google

Der Leistungsfaktor ist Maximum, d. h. sein Wert ist $= 1$, oder $\varphi = 0$, wenn

$$r = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{c\omega} - l\omega\right)^2}$$

oder

$$r^2 = r^2 + \left(\frac{1}{c\omega} - l\omega\right)^2$$

Diese Gleichung kann nur so bestehen, wenn

$$\left(\frac{1}{c\omega} - l\omega\right)^2 = 0$$

oder

$$\frac{1}{c\omega} - l\omega = 0.$$

Hieraus wird

$$l = \frac{1}{c\omega^2}$$

oder

$$c = \frac{1}{l\omega^2}$$

oder endlich

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{cl}} = \frac{1}{\sqrt{cl}}$$

Aus den letzten drei Gleichungen ersieht man, in welcher Weise man erreichen kann, daß die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung Null wird. Entweder wählt man bei gegebener Kapazität eine entsprechende Selbstinduktion nach der ersten Gleichung, oder bestimmt laut der zweiten Gleichung eine der gegebenen Selbstinduktion entsprechende Kapazität, oder endlich verändert man die Periodenzahl des Wechselstromes in der Weise, wie sie die letzte Gleichung bedingt.

Digitized by Google

Beispiel.

Eine Induktionsrolle mit dem Ohmschen Widerstande $r = 10$ Ohm und den Selbstinduktionskoeffizienten $l = 4$ Henry ist in einem Wechselstromkreise mit einem Kondensator von der Kapazität $c = 20 . 10^{-6}$ Farad in Serie geschaltet. Aufgabe ist, die in diesem Stromkreise auftretende Stromstärke zu bestimmen, wenn die Spannung der Stromquelle $e_t = 100$ Volt ist.

Die Periodenzahl des Wechselstromes ist gegeben und zwar sei $\sim = 50$. Dann wird

$$\omega = 2\,\pi \sim = 2 . 3{,}14 . 50 = 314$$

sein.

Die Stromstärke ist durch die Gleichung gegeben:

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{c\,\omega} - l\,\omega\right)^2}}.$$

Die gegebenen Werte eingesetzt, wird:

$$i_t = \frac{100}{\sqrt{10^2 + \left(\frac{1}{20 . 10^{-6} . 314} - 4 . 314\right)^2}}$$

oder

$$i_t = 0{,}092 \text{ Ampère.}$$

Dieser Strom wird bei den gegebenen Verhältnissen durch den Stromkreis fließen.

Eine weitere Aufgabe sei die Spannungen e_i und e_c an den Klemmen des Induktionswiderstandes, beziehungsweise des Kondensators zu bestimmen.

Die Spannungsdifferenz zwischen den Klemmen des Induktionswiderstandes ergibt sich aus zwei Komponentspannungen und zwar aus dem Ohmschen Spannungsverluste und der die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion kompen-

sierenden Spannung. Der Ohmsche Spannungsverlust ist $i_t r$, die gegenelektromotorische Kraft, welche kompensiert werden muß, $i_t l \omega$.

Der Zusammenhang zwischen diesen Werten und der gesuchten Spannungsdifferenz ist bekanntlich:

$$e_1 = i_t \sqrt{r^2 + l^2 \omega^2}.$$

Substituiert die Werte:

$$e_1 = 0{,}092 \sqrt{10^2 + 4^2 \cdot \overline{314^2}}$$

oder

$$e_1 = 115 \text{ Volt}.$$

Hieraus ersieht man die interessante Tatsache, daß die eine Komponentspannung größer als die Gesamtspannung ist.

Die zweite Komponente ist e_c und zwar wird

$$e_c = \frac{i_t}{c \omega}$$

oder

$$e_c = \frac{0{,}092}{20 \cdot 10^{-6} \cdot 314} = 14{,}65 \text{ Volt}.$$

Die Tatsache, daß eine Komponente der Spannung größer ist als die Gesamtspannung, ist aus nachfolgenden Erörterungen leicht einzusehen.

Enthält ein Wechselstromkreis nur Ohmschen Widerstand und Kapazität in Serie geschaltet, dann ist die Gesamtspannung immer größer als irgendwelche Komponentspannung und zwar aus dem Grunde, weil letztere im Vektordiagramm immer durch die Hypotenuse jenes rechtwinkeligen Dreieckes dargestellt werden kann, dessen zwei Katheten die Komponentspannungen sind. In einem rechtwinkeligen Dreieck ist aber die Hypotenuse immer länger als die Katheten.

Digitized by Google

Dasselbe steht in dem Fall, wenn der Wechselstromkreis aus in Serie geschalteten Ohmschen und Induktionswiderständen besteht.

Bei unserer gegenwärtigen Disposition aber sind im Stromkreise hintereinander geschaltete Ohmsche und Induktionswiderstände, sowie eine Kapazität vorhanden und das ändert an den Spannungsverhältnissen erheblich. Wie aus dem Vektordiagramm in Fig. 52 ersichtlich, ergibt sich die Lage und Größe des Vektors der Gesamtspannung e_t dadurch, daß man als eine Komponentspannung den Ohmschen Spannungsverlust, als die andere aber jene Spannung betrachtet, welche sich aus der Differenz der Selbstinduktions- und der Kondensatorspannung ergibt, da

$$\overline{OA} = i_t r = e_n$$

$$\overline{OF} = \overline{GD} = e_c \quad \text{und} \quad \overline{OC} = \overline{AD} = e_s.$$

Weiters

$$\overline{AG} = \overline{GD} - \overline{AD} = e_c - e_s$$

wobei e_t die Resultante von e_n und $(e_c - e_s)$ ist.

Nun können aber, um dieselbe e_t Spannung als Resultante hervorzurufen, bei gleichbleibender e_n Spannungskomponente e_c und e_s beliebig groß sein, sie müssen nur der Bedingung Genüge leisten, daß ihre Differenz $(e_c - e_s)$ immer denselben konstanten Wert behält.

Diese Verhältnisse sind in Fig. 53 graphisch dargestellt, wobei angenommen ist, daß der Ohmsche Spannungsverlust immer denselben Wert hat.

Der Ohmsche Spannungsverlust ist durch den Vektor $\overline{OA}$ gegeben. $\overline{OB}$ ist die Kondensatorspannung kompensierende Spannungskomponente, $\overline{OC}$ jene für die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion benötigte. Die Differenz beider ist $\overline{OD}$, da

$$\overline{BD} = \overline{OC} \text{ und } \overline{OD} = \overline{OB} - \overline{BD} = \overline{OB} - \overline{OC}.$$

Die resultierende Spannung e_t ergibt sich als die Hypothenuse des Dreieckes OAF, wobei $\overline{AF} = \overline{OD}$.

Man kann nun e_c und e_s beliebig verändern, nur muß man darauf achten, daß ihre Differenz immer mit $\overline{OD}$ gleich bleibt. Ist z. B. $e_c = \overline{OG}$ und $e_s = \overline{OH}$, sind ferner diese Spannungen so gewählt, daß

$$\overline{OG} - \overline{OH} = OD$$

ist, dann wird die Resultierende denselben Wert und dieselbe Phase haben als zuvor, d. h. die Resultierende ist wieder e_t.

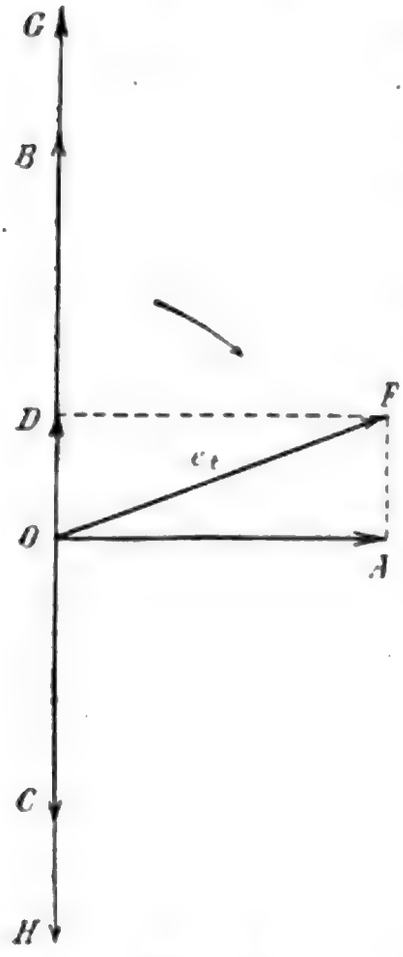


Fig. 53.

Wie groß ist in unserem Beispiele der Leistungsfaktor $\cos\varphi$?

Nach Seite 165 ist

$$\cos\varphi = \frac{e_n}{e_t} = \frac{0{,}092 \cdot 10}{100} = \frac{0{,}92}{100}$$

$$\cos\varphi = 0{,}0092.$$

Der Leistungsfaktor ist sehr klein, was soviel bedeutet, daß der Phasenverschiebungswinkel zwischen Stromstärke und Gesamtspannung nahezu 90^0 ist. Bei obigem Wert wird rund

$$\varphi = 84^0\,40'$$

sein.

Wie groß müßte bei der gegebenen Kapazität der Koeffizient der Selbstinduktion sein, wenn wir erreichen wollten, daß $\varphi = 0$ wird?

In diesem Falle muß, laut dem Vorhergesagten

$$l = \frac{1}{c\,\omega^2}$$

Digitized by Google

sein, oder

$$l = \frac{1}{20 \cdot 10^{-6} \cdot 314^2} = 0{,}508 \text{ Henry.}$$

Dasselbe könnte man erreichen, wenn man bei gegebenen Selbstinduktionskoeffizienten die Kapazität verändert und zwar nach der Gleichung

$$c = \frac{1}{l \omega^2}$$

$$c = \frac{1}{4 \cdot 314^2} = 0{,}394 \cdot 10^{-6} \text{ Farad.}$$

Hat man eine Stromquelle zur Verfügung, deren Periodenzahl verändert werden kann, dann müßte man bei den gegebenen l und c Werten eine solche Periodenzahl herstellen, deren Größe durch die Formel

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{l c}}$$

bestimmt wird.

Nachdem $\omega = 2 \pi \sim$, wird

$$\sim = \frac{1}{2 \pi \sqrt{c l}}$$

In unserem Falle also

$$\sim = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \sqrt{20 \cdot 10^{-6} \cdot 4}} = 17{,}82.$$

Natürlich wird die Stromstärke auch ihren Wert ändern. Nachdem in diesen Fällen keine Phasenverschiebung vorhanden ist, kann das Ohmsche Gesetz ohne Modifikation angewendet werden, ebenso wie in einem Gleichstromkreise, und die gesuchte Stromstärke wird dann:

$$i_t = \frac{e_t}{r} = \frac{100}{10} = 10 \text{ Ampère.}$$

Der Ohmsche Spannungsverlust endlich wäre in diesem Falle gleich mit der Gesamtspannung, d. h.

$$i_t r = 10 . 10 = 100 \text{ Volt.}$$

Untersuchen wir bei der gegebenen Kapazität, Ohmschem Widerstande und Periodenzahl die Veränderung der Stromstärke, wenn der Koeffizient der Selbstinduktion vom Nullwerte allmählich ansteigt. Die Stromstärke wird aus der Formel

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{c\,\omega} - l\,\omega\right)^2}}$$

bestimmt, wobei l veränderlich ist.

Die berechneten Stromstärken sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt:

l Henry	i_t Amp.	l Henry	i_t Amp.	l Henry	i_t Amp.
0,0	0,394	0,4	2,880	0,6	3,210
0,1	0,781	0,5	9,800	0,7	1,630
0,2	1,030	0,508	10,000	0,8	1,080
0,3	1,530				

Hieraus ist ersichtlich, daß die Stromstärke bei zunehmender Selbstinduktion anfangs sehr langsam zunimmt, später wird die Zunahme rascher, ja sie erfolgt zwischen $l = 0{,}4$ und $l = 0{,}508$ Henry sprungmäßig, bei letzterem Wert ist die Stromstärke das erreichbare Maximum, über diese Grenze nimmt sie wieder erst rasch, dann langsamer ab.

Dieses Verhalten ist ähnlich der Resonanz in der Akustik, weshalb man diese Erscheinung elektrische Resonanz nennt. Sie tritt immer in solchen Stromkreisen auf, welche Ohmsche und induktive Widerstände und Kapazität enthalten und nur dann,

wenn die gegenelektromotorischen Kräfte der Selbstinduktion und der Kapazität einander gleich sind.

Für die Entstehung der Resonanzerscheinung ist also Bedingung, daß

$$i_t l \omega = \frac{i_t}{c \omega}$$

oder

$$l \omega - \frac{1}{c \omega} = 0.$$

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ verändert sich laut der Formel auf Seite 165 mit der Änderung der Größe l ebenso wie die Stromstärke. Sein Wert ist klein, bei anwachsender Selbstinduktion nimmt er erst langsam, dann rascher zu, wird bei maximaler Stromstärke maximal, da in diesem Falle die Phasenverschiebung Null ist, später nimmt sein Wert wieder rasch ab, um dann langsam stetig zum Nullwerte sich zu nähern.

Die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion wird im Grenzfalle, wenn $\varphi = 0$, wenn also die Resonanzerscheinung eintritt, am größten sein und zwar beträgt ihr Wert

$$i_t l \omega = 10 \,.\, 0{,}508 . 314 = 1595{,}12 \text{ Volt.}$$

Hieraus ersehen wir, daß wenn die Gesamtspannung auch nur 100 Volt beträgt, im Stromkreise bei der Resonanzerscheinung solche Spannungen auftreten können, welche weit größer als die Gesamtspannung sind. Die Resultierende aus den drei Spannungen: dem Ohmschen Spannungsverluste, der elektromotorischen Kraft der Selbstinduktion und jener der Kapazität ergibt darum doch nur den niedrigen Wert der Gesamtspannung.

In Wechselstromkreisen muß man auf die Resonanzerscheinungen besondere Rücksicht nehmen, denn die eventuell auftretenden hohen Spannungen können sehr unangenehme und nachteilige Folgen haben.

Digitized by Google

Ohmscher Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität in Parallelschaltung.

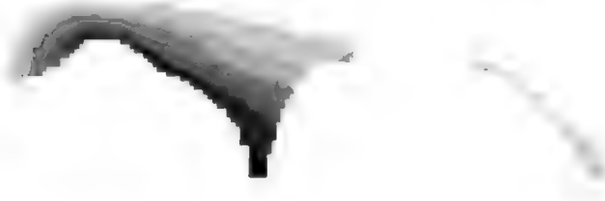
In Fig. 54 ist eine Schaltungsanordnung dargestellt, bei welcher ein Ohmscher und induktiver Widerstand mit einer Kapazität parallel geschaltet ist. Der Ohmsche Widerstand sei r, der Koeffizient der Selbstinduktion l, die Kapazität des Kondensators c. In der ungeteilten Leitung fließt ein Strom von der Intensität i_t, dieser teilt sich in die Teilströme i_1 und i_2. Die Periodenzahl des Wechselstromes ist gegeben, folglich kann ω bestimmt werden, auch ist die Gesamtspannung e_t bekannt.

Nachdem von Parallelschaltung die Rede ist, wird die Spannungsdifferenz sowohl zwischen den Endpunkten des Induktionswiderstandes mit dem Ohmschen Widerstande r, als auch an den Klemmen des Kondensators gleich mit e_t sein, letztere ist also die gemeinsame Spannung.

Wir nehmen an, daß der Ohmsche Widerstand der Kondensatorzuleitungen so klein ist, daß er vernachlässigt werden kann.

i_t ergibt sich als die Resultierende der Teilströme i_1 und i_2. Um sie ermitteln zu können, muß man die Phasenverhältnisse kennen.

Betrachten wir zunächst jenen Stromzweig, welcher den Induktionswiderstand enthält. In diesem Zweige ist ein Ohmscher und ein induktiver Widerstand in Serie geschaltet. Die Spannungsdifferenz zwischen den Endpunkten, also die Gesamtspannung e_t kann als die Resultante zweier Spannungskomponenten dargestellt werden und zwar ist eine Komponente der Ohmsche Spannungsverlust, die zweite die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion. Der Zusammenhang zwischen diesen Spannungswerten ist durch ein rechtwinkeliges Dreieck gegeben, dessen Katheten die



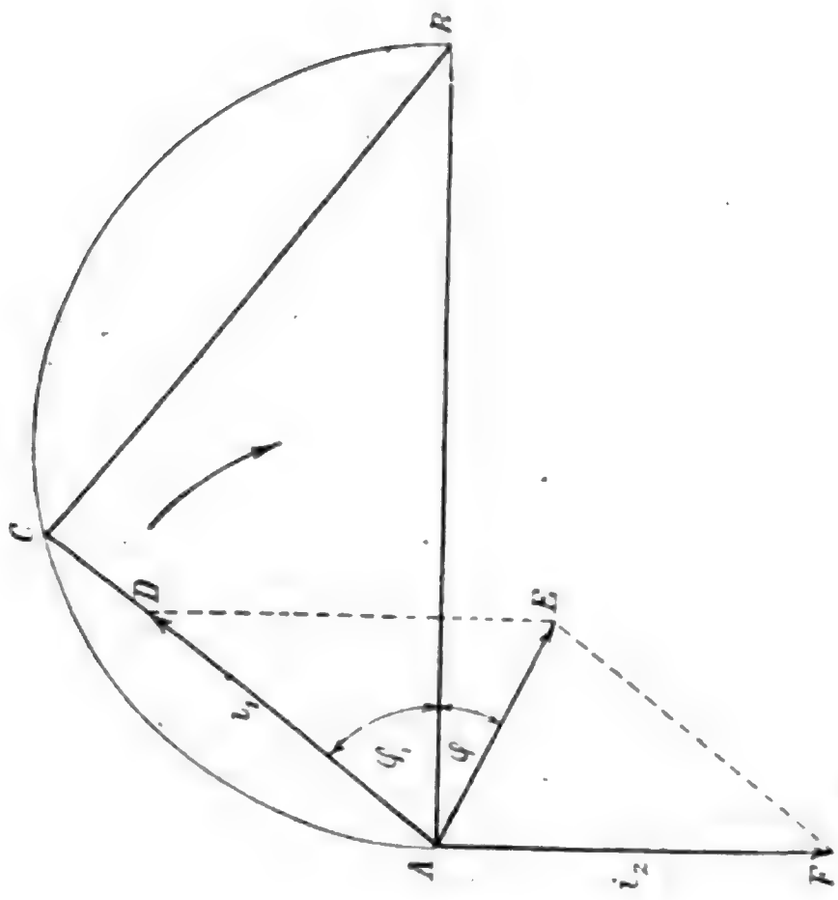
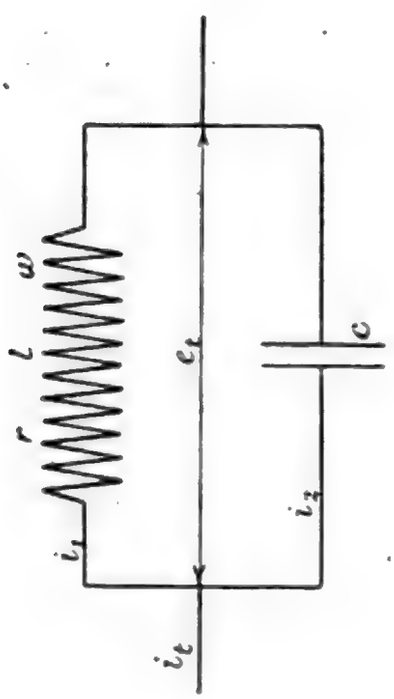


Fig. 54.



Komponentspannungen und dessen Hypotenuse die Gesamtspannung bilden, wie dies auch in Fig. 42 gezeigt wurde.

Wollen wir daher die Phasenverhältnisse in unserem Falle bestimmen, dann müssen wir zunächst das obenerwähnte rechtwinkelige Dreieck konstruieren. Zu diesem Behufe schlägt man über $\overline{AB} = e_t$ mit dem Halbmesser $\frac{e_t}{2}$ einen Halbkreis und bestimmt die Lage des Punktes C, wobei $\overline{AC} = e_n$ der Ohmsche Spannungsverlust und $\overline{BC} = e_s$ die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion bedeuten.

e_n wurde durch den Teilstrom i_1 im Ohmschen Widerstande r hervorgerufen, und nachdem der Strom und der Ohmsche Spannungsverlust immer in Phase sind, muß der Stromvektor i_1 in die Richtung $\overline{AC}$ fallen. Wenn wir also i_1 berechnen, dann tragen wir nur im geeigneten Maßstabe seinen Wert in der Richtung AC auf und haben dadurch die Größe und die relative Lage des Vektors der Stromstärke.

Wie aus dem Diagramm ersichtlich, ist i_1 gegen die Gesamtspannung e_t in der Phase um den Winkel φ_1 verschoben.

Was i_2 betrifft, so wissen wir, daß dies nur der Ladestrom des Kondensators ist, da wir annahmen, daß der Ohmsche Widerstand des Kondensatorzweiges vernachlässigt werden kann. Dieser Strom eilt also in der Phase der Gesamtspannung um eine Viertelperiode vor, sein Vektor ist demnach im Vektordiagramm durch die senkrechte Linie i_2 gegeben.

Aus i_1 und i_2, dessen Größen und relative Lagen nunmehr völlig bekannt sind, läßt sich der Gesamtstrom i_t in der ungeteilten Leitung bestimmen und zwar ist i_t die Resultierende von i_1 und i_2. Dieser Strom hat zur Spannung einen

Digitized by Google

Phasenverschiebungswinkel von φ. i_t ist gegen die Gesamtspannung e_t phasenverfrüht oder phasenverspätet, je nachdem der Strom i_2 größer, beziehungsweise kleiner als $\overline{DE}$ ist. Wird $i_2 = \overline{DE}$, dann ist $\varphi = 0$, d. h. in diesem Falle ist zwischen der Stromstärke und der Spannung im Hauptstromkreise keine Phasenverschiebung vorhanden.

Aus dem Vektordiagramm ist ersichtlich, daß der resultierende Strom kleiner als ein Teilstrom ist, und zwar wird unter sonst gleichen Umständen i_t umso kleiner, je größer der Phasenverschiebungswinkel φ_1 wird.

Sehen wir nun die Berechnung der hier vorkommenden Größen.

Die Stromstärke i_1 ist durch die Größe des Ohmschen Widerstandes und der Selbstinduktion bestimmt. Bei den angenommenen Werten wird

$$i_1 = \frac{e_t}{\sqrt{r^2 + l^2 \omega^2}}$$

sein, wenn

$$\omega = 2 \pi \sim$$

und $\sim$ die gegebene Periodenzahl des Wechselstromes ist.

Die Intensität des Ladestromes mit i_2 bezeichnend, wird wie bekannt

$$i_2 = c\, e_c\, \omega.$$

Die Gesamtstromstärke i_t in der ungeteilten Leitung läßt sich berechnen, wenn man den resultierenden Widerstand in Betracht nimmt. Der Widerstand des einen Zweiges ist $\sqrt{r^2 + l^2 \omega^2}$, jener des zweiten $\frac{1}{c\,\omega}$ und aus diesen beiden Werten ergibt sich dann der resultierende Widerstand, dessen Ausdruck folgender ist:

Digitized by Google

$$R_x = \sqrt{\frac{r^2 + l^2\omega^2}{c^2\omega^2\left(r^2 + \omega^2\left[l - \frac{1}{c\omega^2}\right]^2\right)}}$$

Nun wird

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{\frac{r^2 + l^2\omega^2}{c^2\omega^2\left(r^2 + \omega^2\left[l - \frac{1}{c\omega^2}\right]^2\right)}}}$$

Zahlenbeispiel.

Eine Induktionsspule mit dem Omschen Widerstande $r = 10\,\Omega$ und dem Selbstinduktionskoeffizienten $l = 0{,}5$ Henry ist mit einem Kondensator, dessen Kapazität $c = 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ Farad beträgt, parallel geschaltet. Die Gesamtspannung ist gegeben, und zwar $e_t = 100$ Volt, sowie die Periodenzahl $\sim = 50$.

Bei diesen Werten sind die Stromstärken zu bestimmen.

Durch den Induktionswiderstand fließt ein Strom, dessen Stärke

$$i_1 = \frac{e_t}{\sqrt{r^2 + l^2\omega^2}}$$

ist, wobei

$$\omega = 2\pi \sim = 2\pi \cdot 50 = 314.$$

Die gegebenen Werte eingesetzt, wird:

$$i_1 = \frac{100}{\sqrt{10^2 + 0{,}5^2 \cdot 314^2}} = 0{,}64 \text{ Ampère.}$$

Im Kondensatorkreis fließt die Stromstärke

$$i_2 = c\, e_t\, \omega$$

$$i_2 = 0{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 314 = 0{,}314 \cdot 10^{-2}.$$

Digitized by Google

Der Gesamtstrom i_t wird demnach:

$$i_t = \frac{100}{\sqrt{\frac{10^2 + \overline{0{,}5^2 \cdot 314^2}}{0{,}1^2 \cdot 10^{-12} \cdot 314^2 \left(10^2 + 314^2 \left[0{,}5 - \frac{1}{0{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 314^2} \right]^2 \right)}}}$$

sein.

Berechnet, ist:

$$i_t = 0{,}638 \text{ Ampère},$$

d. h. bald soviel, wie der Strom i_1.

Ohmscher Widerstand und Kondensator in Parallelschaltung.

In einem Stromkreise sei ein Ohmscher Widerstand r mit einem Kondensator von der Kapazität c parallel geschaltet. Es sind die Strom- und Phasenverhältnisse zu ermitteln.

Die Schaltungsanordnung ist dieselbe wie in Fig. 54, nur ist anstatt der Induktionsspule ein Ohmscher Widerstand in den einen Zweig zu schalten. In diesem Stromzweige wird zwischen der Spannung e_t und dem Teilstrome i_1 keine Phasenverschiebung sein, da hier weder Selbstinduktion noch Kapazität vorhanden sind. Es gilt also das Ohmsche Gesetz in jener unveränderten Form, wie beim Gleichstrom, d. h. es wird

$$i_1 = \frac{e_t}{r}$$

sein.

Nachdem im zweiten Stromzweige der Ohmsche Widerstand verschwindend klein ist, kann man i_2:

$$i_2 = c\, e_t\, \omega$$

setzen. Dieser Strom eilt der Spannung in der Phase um 90^0, d. h. um eine Viertelperiode vor.

Digitized by Google

Der Gesamtstrom in der Hauptleitung ergibt sich als die Resultierende dieser Teilströme, sein Vektor wird also durch die Hypothenuse eines solchen rechtwinkeligen Dreieckes gegeben, dessen Katheten die zwei Teilstromvektore sind.

Die Phasenverhältnisse sind in Fig. 55 dargestellt. $\overline{OA}$ ist der Vektor der gemeinsamen Spannung e_t, mit welcher der Vektor des Stromes i_1 zusammenfällt. Der letztere ist durch $\overline{OB}$ gegeben. Bei der angedeuteten Drehrichtung wird $\overline{OC}$ die relative Lage des Stromes i_2 geben, und zwar ist zwischen $\overline{OB}$ und $\overline{OC}$ ein Phasenunterschied von 90^0

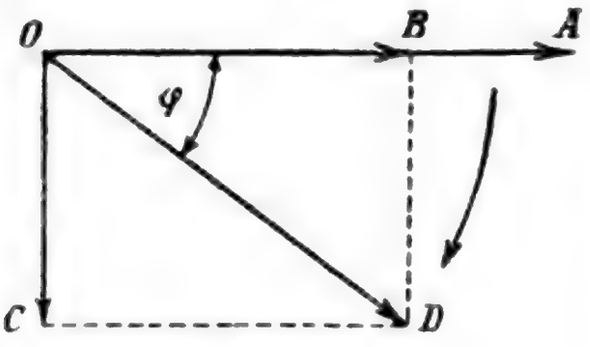


Fig. 55.

Der Gesamtstrom setzt sich aus diesen Strömen zusammen; wenn wir also in bekannter Weise die Resultante bilden, erhalten wir $\overline{OD}$ als den gesuchten Vektor der Stromstärke i_t. Dieser eilt der Spannung in der Phase um den Winkel φ vor. Sein Wert ist aus dem Dreieck OBD zu berechnen, und zwar:

$$\overline{OD^2} = \overline{OB^2} + \overline{BD^2} = \overline{OB^2} + \overline{OC^2}$$

oder

$$OD^2 = i_t^2 = i_1^2 + i_2^2.$$

Hieraus wird

$$i_t = \sqrt{i_1^2 + i_2^2}.$$

Die gefundenen Werte substituiert,

$$i_t = \sqrt{\frac{e_t^2}{r^2} + c^2 e_t^2 \omega^2}$$

oder

$$i_t = e_t \sqrt{\frac{1}{r^2} + c^2 \omega^2}.$$

Nachdem aber

$$\sqrt{\frac{1}{r^2} + c^2\omega^2} = \frac{1}{r}\sqrt{1 + r^2 c^2 \omega^2}$$

ist, wird

$$i_t = \frac{e_t}{r}\sqrt{1 + r^2 c^2 \omega^2}.$$

Zu demselben Ergebnis kommt man, wenn man in der Formel i_t auf Seite 178 $l = 0$ setzt.

Der Cosinus des Phasenverschiebungswinkels φ ergibt sich aus dem Vektordiagramm, und zwar wird

$$\cos\varphi = \frac{\overline{OB}}{\overline{OD}} = \frac{i_1}{i_t} = \frac{1}{\sqrt{1 + r^2 c^2 \omega^2}}.$$

Hieraus ist ersichtlich, daß der Phasenverschiebungswinkel Null, d. h. der Cosinus dieses Winkels Eins wird, wenn

$$1 = \sqrt{1 + r^2 c^2 \omega^2}.$$

Diese Bedingung kann nur dadurch erfüllt werden, daß man $c = 0$ setzt. In diesem Falle ist im Stromkreise kein Kondensator, nur Ohmscher Widerstand, folglich muß in diesem Falle das unveränderte Ohmsche Gesetz Geltung haben und der Strom mit der Spannung in der Phase übereinstimmen.

Nachdem der Strom i_t außer $\frac{e_t}{r}$ in seinem Ausdrucke noch einen Faktor hat, der größer als die Einheit ist, wird sein Wert immer größer sein, als derjenige von i_1. Dasselbe steht i_2 betreffend, da i_t die Hypotenuse jenes rechtwinkeligen Dreieckes ist, dessen eine Kathete durch i_2 gebildet wird.

Die Phasenverschiebung ist maximal, d. h. $\cos\varphi = 0$ und $\varphi = 90^0$, wenn im obigen Ausdrucke

Digitized by Google

$$\sqrt{1 + r^2 c^2 \omega^2} = 0$$

oder wenn

$$1 = -r^2 c^2 \omega.$$

Hieraus ist

$$r = \sqrt{-\frac{1}{c^2 \omega^2}}.$$

Nachdem dies eine imaginäre Zahl ist, kann man diese Bedingung nicht erfüllen, was besagt, daß bei parallel geschaltetem Ohmschen Widerstande und Kapazität weder der Widerstand, noch die Kapazität so gewählt werden können, daß der Phasenverschiebungswinkel zwischen Gesamtstrom und Spannung 90^0 wird.

Um die Verhältnisse besser überblicken zu können, sehen wir ein Beispiel.

Ein Ohmscher Widerstand von $r = 10\,\Omega$ ist mit einem Kondensator von der Kapazität $c = 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ Farad parallel geschaltet, wobei die Spannung des Stromkreises $e_t = 100$ Volt beträgt.

Die Stromstärke im Ohmschen Widerstande ist

$$i_1 = \frac{100}{10} = 10 \text{ Ampère.}$$

Im Kondensatorkreise dagegen, wenn die Periodenzahl $\sim = 50$ ist:

$$i_2 = 0{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50$$

$$i_2 = 0{,}314 \cdot 10^{-2} \text{ Ampère.}$$

Wie groß wird die Gesamtstromstärke i_t in der ungeteilten Leitung?

$$i_t = \sqrt{10^2 + 0{,}314^2 \cdot 10^{-4}}.$$

Das zweite Glied des Wurzelausdruckes ist so klein, daß es vernachlässigt werden kann, demnach

Digitized by Google

$$i_t \doteq \sqrt{10^2} \doteq 10 \text{ Ampère}$$

d. h. bald so groß wird als der Strom i_1.

Unter solchen Umständen wird natürlich

$$\cos\varphi \doteq \frac{i_1}{i_t} \doteq \frac{10}{10} = 1$$

d. h.

$$\varphi = 0$$

oder zwischen den Gesamtstrom und der Spannung ist keine Phasenverschiebung, wenn i_2 vernachlässigt wird.

Ohmscher, induktiver Widerstand und Kondensator mit einem anderen Kondensator parallel geschaltet.

In Fig. 56 ist ein kombinierter Stromkreis dargestellt. Es sind zwei parallel geschaltete Zweige

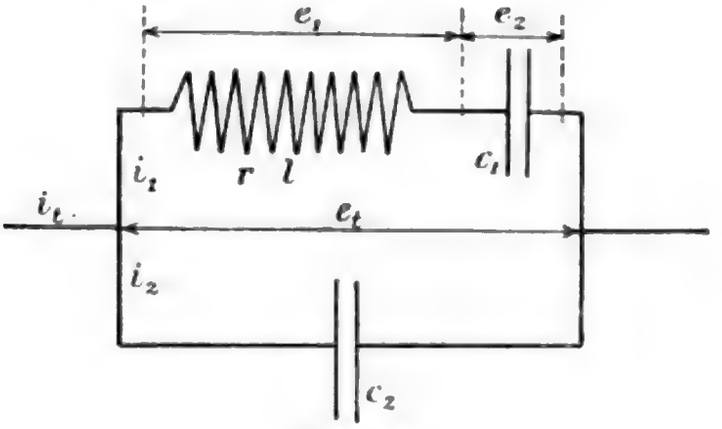


Fig. 56.

vorhanden, deren eines einen Kondensator mit der Kapazität c_1 und einen induktiven Widerstand mit dem Selbstinduktionskoeffizienten l und dem Ohmschen Widerstande r enthält. Der andere Zweig hat nur einen Kondensator von der Kapazität c_2. Wir nehmen an, daß der Ohmsche Widerstand dieses Zweiges vernachlässigt werden kann. Der

Gesamtstrom sei mit i_t, die Teilströme mit i_1 und i_2, die gemeinsame Spannung mit e_t bezeichnet.

Diese Spannung hat im ersten Zweige zwei Komponenten, und zwar die Spannung e_1 zwischen den Endpunkten des Induktionswiderstandes und die Spannung e_2 an den Klemmen des Kondensators. Für den zweiten Zweig ist die Spannung e_t gleich mit der Kondensatorspannung, da in diesem Stromkreise der Ohmsche Widerstand vernachlässigt worden ist.

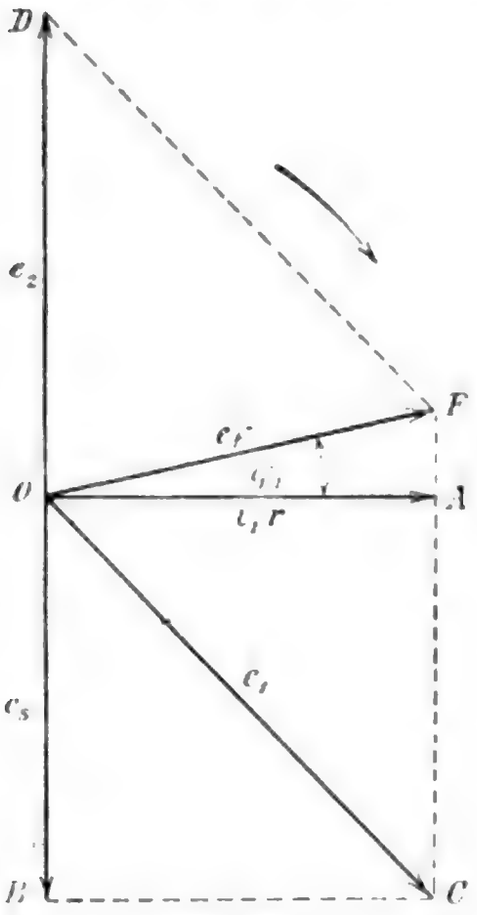


Fig. 57.

In Fig. 57 sind die Spannungsverhältnisse dargestellt.

Für den ersten Zweig sind die Verhältnisse dieselben, wie im Stromkreise der Fig. 52. e_1 ist die Resultante des Ohmschen Spannungsverlustes $i_1 r$ im Ohmschen Widerstande der Induktionsspule und der die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion kompensierenden Spannungskomponente e_s. Ist $i_1 r = \overline{OA}$ und $e_s = \overline{OB}$, dann wird $\overline{OC} = e_1$ sein.

In diesem Zweige ist aber auch eine Kondensatorspannung vorhanden, dessen Vektor durch $\overline{OD} = e_2$ gegeben ist. Die Gesamtspannung e_t kann also als die Resultante der Spannungen e_1 und e_2 bestimmt werden. Im Vektordiagramm ist dies mit $\overline{OF} = e_t$ bezeichnet.

Für den zweiten Zweig brauchen wir diese Konstruktion des Vektors der gesamtelektromotorischen Kraft nicht durchzuführen, da in diesem Stromkreise nur die Kapazität vorhanden ist, weshalb die Spannungsdifferenz an den Klemmen des

Digitized by Google

Kondensators gleich groß und in der Phase gleichliegend mit der zuvor bestimmten elektromotorischen Kraft e_t ist.

Der Vektor des Stromes i_1 fällt in die Richtung $\overline{OA}$, so daß die Phasenverschiebung zwischen der Stromstärke und der Spannung im ersten Zweige durch den Winkel φ_1 gegeben ist.

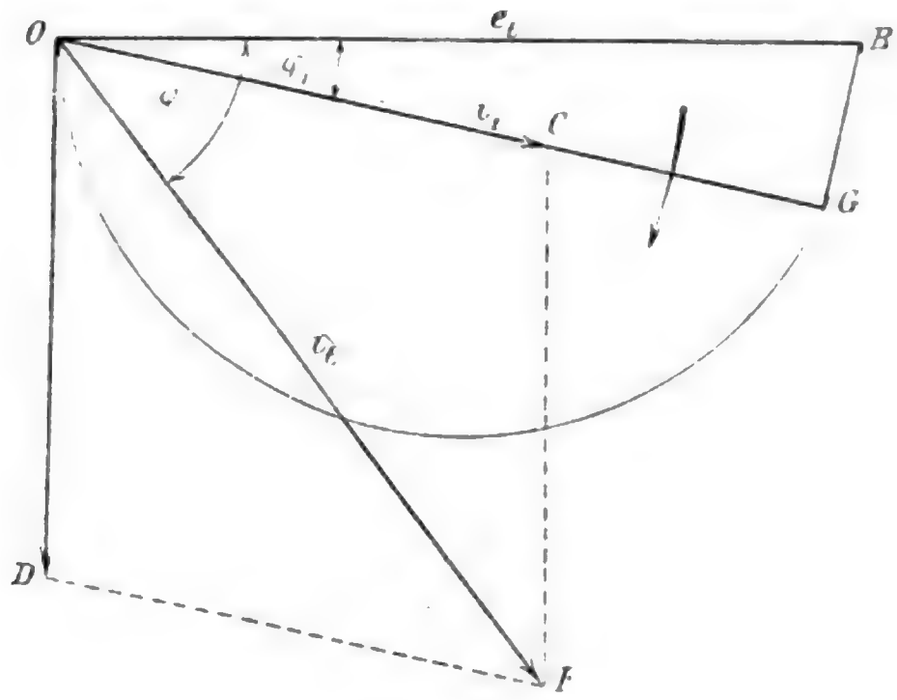


Fig. 58.

Was die Stromstärken betrifft, so lassen sich dieselben durch folgende Überlegungen konstruieren. Das rechtwinkelige Dreieck OFA hat zur Hypotenuse die Gesamtspannung e_t, zu Katheten den Ohmschen Spannungsverlust $\overline{OA} = i_1 r$ und die Spannungskomponente $\overline{AF}$, welche sich aus der Differenz der Selbstinduktions- und der Kondensatorspannung e_2 ergibt. In diesem Dreiecke ist $\overline{OA} \perp FA$, das Dreieck läßt sich also konstruieren, wenn man mit dem Halbmesser $\frac{\overline{OF}}{2}$ einen Halbkreis zieht und auf diesem den Punkt A sucht.

Diese Konstruktion ist in Fig. 58 durchgeführt, welche mit Fig. 57 insoferne korrespondiert, daß $\overline{OB} = \overline{OF} = e_t$, weiters $\overline{OG} = \overline{OA} = i_1 r$ und $\overline{BG} = \overline{FA}$. Ferner ist $\sphericalangle FOA = \varphi_1 = \sphericalangle BOG$.

Der Vektor der Stromstärke i_1 fällt in die Richtung $\overline{OG}$. Die Stromstärke im zweiten Kreise eilt der Spannung in der Phase um eine Viertelperiode, also um 90^0 voraus, ihr Vektor wird demnach durch $\overline{OD} = i_t$ gegeben. Der Gesamtstrom im ungeteilten Kreise ist also die Resultante von i_1 und i_2, ihr Vektor kann sonach auch bestimmt werden, und zwar wird $\overline{OF} = i_t$ sein. Dieser Strom eilt der Gesamtspannung in der Phase um den Winkel φ vor.

Dies sind die Strom-, Spannungs-, beziehungsweise Phasenverhältnisse in dem Falle, wenn zwei Stromkreise vorhanden sind, deren einer Ohmschen — induktiven — Widerstand und Kapazität, deren anderer aber nur Kapazität enthält.

Digitized by Google

VI. Kapitel.

Verschiedene Wellenformen.

Bei den bisherigen Erörterungen nahmen wir immer an, daß die Veränderungen der elektrischen Wechselgrößen stets nach dem Sinusgesetze erfolgen, daß also diese Veränderungen mit einer Sinuskurve dargestellt werden können. Unter dieser Bedingung lassen sich die Vorgänge im elektrischen Wechselstromkreis ohne größere Schwierigkeiten rechnerisch verfolgen und lassen sich zwischen den verschiedenen Größen einfache Beziehungen aufstellen. Der arithmetische, der effektive Mittelwert, die Leistung des Wechselstromes, die Phasenverschiebung etc. können durch einfache Formeln ausgedrückt werden.

In der Wirklichkeit sind indessen die Verhältnisse zumeist solche, daß infolge störender Ursachen die Veränderungen nicht nach dem Sinusgesetz verlaufen, sondern eine mehr oder minder komplizierte Form annehmen. In solchen Fällen geben die abgeleiteten Formeln nicht mehr den richtigen Wert, man muß vielmehr entsprechende Korrektionen vornehmen.

Die Ursachen, welche eine Veränderung der Sinuskurve herbeiführen, sind sehr verschieden. In den meisten Fällen ist die Stromquelle selbst solcher Natur, daß die erzeugte elektromotorische Kraft keine sinusförmige ist, in anderen Fällen

Digitized by Google

liegt die Ursache im Stromkreise, infolge welcher die ursprüngliche Sinuswellenform verzerrt und eine kompliziertere Wellenform erzeugt wird.

Ein solcher Fall ist z. B. der, in welchem der sinusförmige Wechselstrom eine Spule mit einem Eisenkern durchfließt. Im Eisenkerne entsteht magnetische Hysteresis und es werden Wirbelströme induziert; diese Erscheinungen haben dann zur Folge, daß die Welle der Stromstärke ihre Sinusform verliert und eine verzerrte Form annimmt Kennt man die Hysteresisschleife des Eisenkernes, dann läßt sich die neue Kurvenform der Stromstärke aus derselben bestimmen.

Fließt ein Wechselstrom, der sich nach dem Sinusgesetz ändert, durch eine Drahtspule, welche kein magnetisches Material enthält, dann entsteht ringsum der Spule ein magnetisches Feld, dessen Stärke ebenso variiert, wie diejenige des Stromes, d. h. die Änderung des magnetischen Feldes kann durch eine Gleichung ausgedrückt werden, welche folgende Form hat:

$$v = N \sin \omega t$$

wobei v den Momentwert des magnetischen Feldes, N aber dessen Maximalwert bedeutet.

Im Raume entstehen magnetische Kraftlinien, von deren Anzahl die Intensität des magnetischen Feldes abhängt. Setzen sämtliche Kraftlinien die Fläche S durch, dann nennt man die auf die Flächeneinheit fallende Kraftlinienzahl

$$\mathfrak{B} = \frac{N}{S}$$

die Magnetisierung des fraglichen Mediums. Bei Wechselströmen entsteht ein wechselndes magnetisches Feld, folglich kann auch hier von Moment- und Maximalwerten die Rede sein. Unsere oben angeführten Bezeichnungen benützend, wird der

Digitized by Google

Momentwert der Magnetisierung

$$b = \frac{v}{S}$$

sein.

Wird nun ein Eisenstück gleichmäßig wechselnder magnetisierender Kraft ausgesetzt, dann ist seine Magnetisierung nicht mehr mit der magnetisierenden Kraft proportional, auch nimmt die Magnetisierung in verschiedenem Maße zu, respektive ab, wenn die magnetisierende Kraft zu-, beziehungsweise abnimmt. Stellt man diese Verhältnisse durch ein Diagramm dar, dann erhält man eine schleifenähnliche Kurve, wie in Fig. 33 für verschiedene Eisensorten gezeigt wurde.

Die magnetisierende Kraft pro 1 *cm* Kraftlinienweg kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$H = \frac{4\pi}{10}\frac{n\,i}{l}$$

wo n die durch den Strom i durchflossene Windungszahl der Spule und l den gesamten Kraftlinienweg in Zentimeter bedeutet. In obiger Formel ist i in Ampère gemessen, deshalb ist im Nenner der Faktor 10 vorhanden.

Man kann nun auch eine Hysteresisschleife bilden, bei welcher die Ordinaten die Momentwerte der Magnetisierung, die Abscissen dagegen die jeweiligen Stromstärken bedeuten. Man muß nur in Fig. 33 die Werte $\mathfrak{B}$ und H mit S, beziehungsweise mit $\frac{10\,l}{4\pi n}$ multiplizieren Fig. 59 stellt eine solche Schleife dar. Aus dieser ist ersichtlich, daß die Stromstärke ihren Maximalwert erreicht, wenn das magnetische Feld maximal ist, beim Nullwerte des Stromes hat das magnetische Feld eine gewisse Stärke noch und der Strom muß schon

entgegengesetzt wirken, damit das Feld gänzlich verschwindet.

Bei unmagnetischen Materialen ist keine Hysteresis vorhanden. Warburg zeigte, daß die Größe der durch die Hysteresisschleife umschlossenen Fläche proportional mit der Ummagnetisierungs-

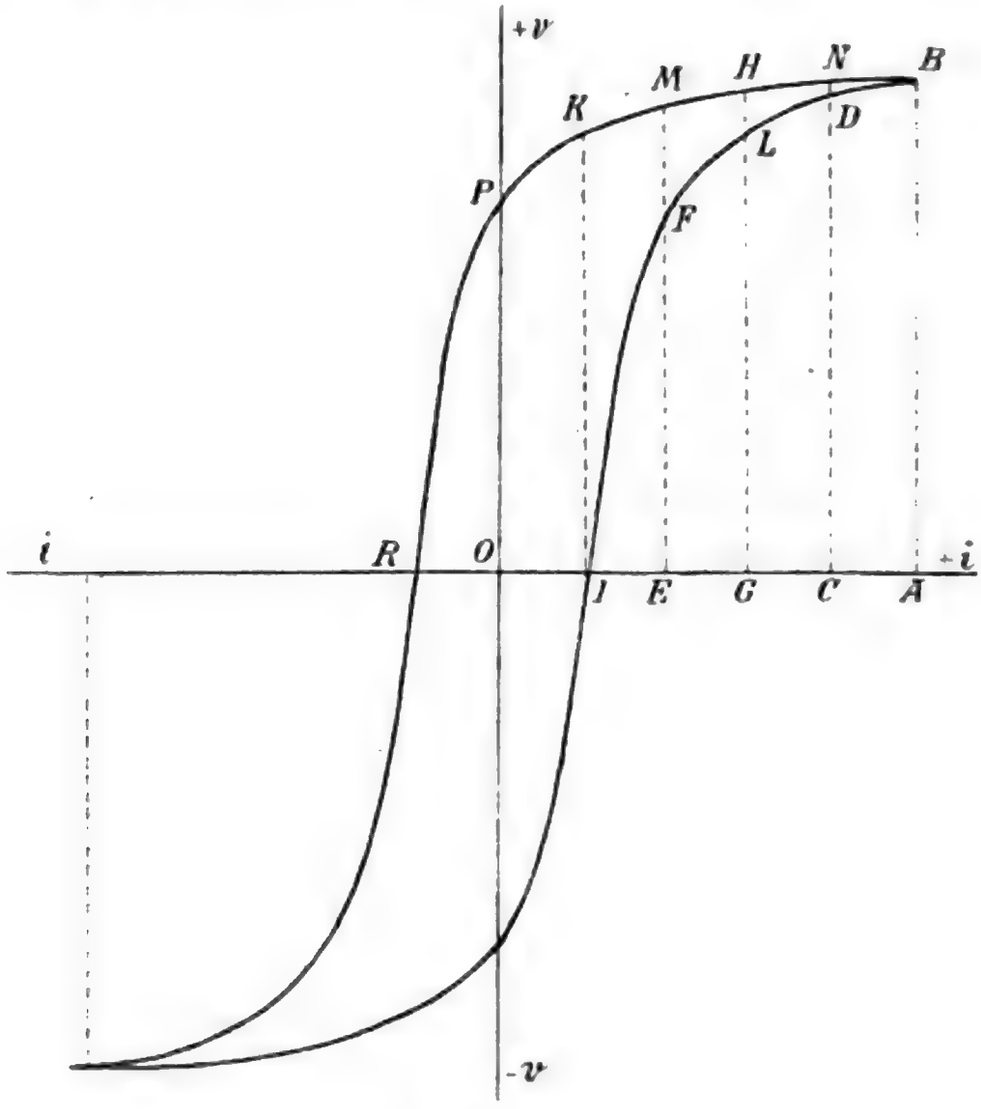


Fig. 59.

arbeit ist. Nachdem bei nichtmagnetischen Medien die Hysteresisarbeit Null ist, kann die Schleife keine Fläche umschließen, d. h. die Schleife wird zu einer einzigen Linie. Hieraus folgt, daß bei solchen Körpern zwischen der Erregerstromstärke und dem magnetischen Felde einfache Proportionalität besteht, oder daß einer bestimmten Strom-

Digitized by Google

stärke dasselbe magnetische Feld entspricht, unabhängig davon, ob die Stromstärke, beziehungsweise das magnetische Feld im Zu- oder Abnehmen begriffen ist. Es folgt auch aus der einfachen Proportionalität, daß die Kurve für nichtmagnetische Materialien die Form einer Geraden annimmt.

Sehen wir nun, in welcher Weise die Kurve der Stromstärke durch die Hysteresis beeinflußt

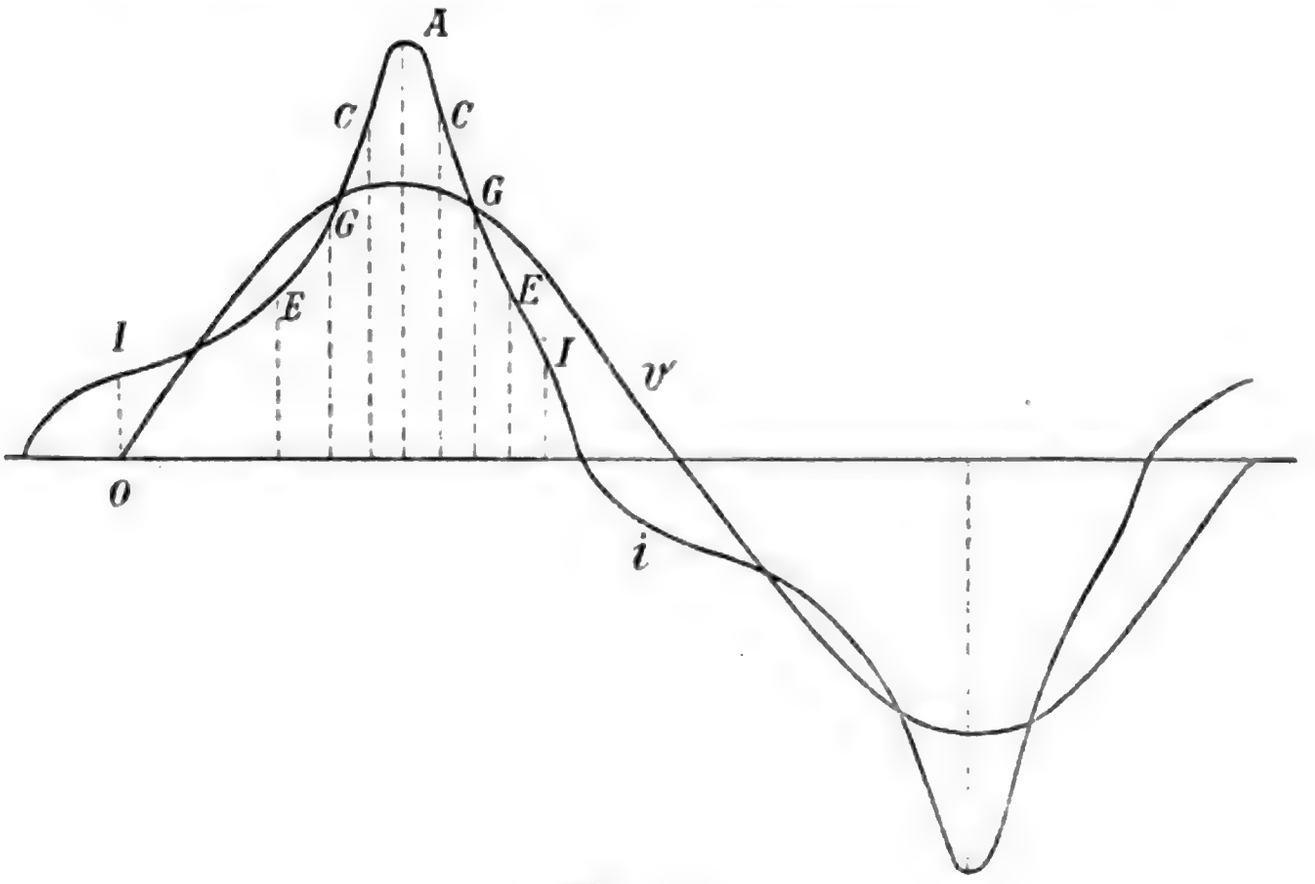


Fig. 60.

wird, wenn das magnetische Feld nach dem Sinusgesetze sich ändert, d. h. wenn:

$$v = N \sin \omega t.$$

Dies ist eine Sinuskurve, welche in Fig. 60 durch v dargestellt ist. Die Stromkurve war ursprünglich auch eine Sinuslinie, sie hat aber durch die Hysteresis ihre Gestalt geändert und jene Form angenommen, welche in der Figur mit i bezeichnet ist.

Digitized by Google

Diese letztere läßt sich aus der Fig. 59 konstruieren. In dieser ist die Abscissenachse die Strom-, die Ordinatenachse dagegen die magnetische Feldachse; aus dieser Figur kann man also entnehmen, welcher Stromstärke ein gewisses magnetisches Feld entspricht und umgekehrt. Bei maximaler Erregerstromstärke ist auch das magnetische Feld maximal, diese zwei Werte fallen also im Wellendiagramm in der Phase zusammen. Für die Nullwerte steht dies nicht, denn der Strom ist dem Felde in der Phase und einen bestimmten Winkel vor, dessen Größe von den magnetischen Eigenschaften des Materiales abhängt.

Was die Konstruktion der Kurve betrifft, so wird dieselbe folgendermaßen durchgeführt. Wir wissen, daß infolge des remanenten Magnetismus die Nullwerte der Strom- und magnetischen Feldkurve nicht zusammenfallen können, sondern es ist eine gewisse entgegengesetzt magnetisierende Stromstärke nötig, um den remanenten Magnetismus verschwinden zu lassen. Ist daher in Fig. 59 $v = 0$, dann muß i schon einen gewissen Wert haben, und zwar ist in diesem Falle $i = \overline{OJ}$. Wächst die Stromstärke weiter und nimmt sie die Werte $\overline{OE}$, $\overline{OG}$, $\overline{OC}$ und $\overline{OA}$ an, dann wird die Größe des magnetischen Feldes dementsprechend durch die anwachsenden Ordinaten $\overline{EF}$, $\overline{GL}$, $\overline{CD}$, beziehungsweise $\overline{AB}$ gegeben.

Nimmt nun die Stromstärke allmählich ab, dann wird zwar auch das magnetische Feld schwächer, doch nicht im selben Maße, als die Verstärkung erfolgt war, sondern langsamer. Bei denselben Erregerstromstärken sind demnach die entsprechenden magnetischen Felder durch die Ordinaten $\overline{CN}$, $\overline{GH}$, $\overline{EM}$, $\overline{JK}$ und $\overline{OP}$ dargestellt. Bei verschwundenem Strome i ist das magnetische Feld noch ziemlich intensiv, welche Er-

Digitized by Google

scheinung den remanenten Magnetismus zur Ursache hat.

Um diese Verhältnisse im Wellendiagramm darstellen zu können, müssen wir nur zu den einzelnen v Werten die dazugehörigen Stromwerte auftragen. Man erhält hierdurch die gesuchte, durch die Hysteresis verzerrte Stromkurve i.

Der Einfluß der Hysteresis ist leicht einsehbar. Je breiter die Hysteresisschleife, d. h. je größere Hysteresisarbeit ein Material erheischt, um so verzerrter wird die Stromkurve, und umgekehrt. Die Stromkurve nähert sich in ihrer Form der magnetischen Feldkurve um so mehr, je schmaler die Hysteresisschleife wird. Bei nichtmagnetischen Materialen ist diese Schleife durch eine Gerade ersetzt, bei diesen ist also der Verlauf der Stromkurve derselbe wie derjenige der Feldkurve.

Das magnetische Feld ist eine Funktion der Ampèrewindungszahl ni und des gesamten magnetischen Widerstandes des magnetischen Kreises:

$$v = \frac{4\pi}{10}\,\frac{ni}{w}$$

wo w den magnetischen Widerstand des magnetischen Kreises bedeutet. Ist die mittlere Länge der Kraftlinien l, der gleichmäßig gedachte Querschnitt des durch die Kraftlinien durchsetzten Eisenkernes S, die Permeabilität oder magnetische Durchlässigkeit des Materiales μ, dann wird:

$$w = \frac{l}{S\mu}$$

sein. Substituiert, bekommt man:

$$v = \frac{4\pi}{10}\,\frac{ni}{l}\,S\mu.$$

Nachdem in diesem Ausdrucke sowohl i als auch μ veränderlich sind, kann die Veränderung

der Stromstärke nicht denselben Verlauf nehmen als diejenige des magnetischen Feldes. Dies kann nur dann der Fall sein, wenn μ konstant ist, d. h. wenn das magnetische Feld in einem unmagnetischen Material entsteht.

Betrachten wir die so erhaltene Stromkurve, dann sehen wir, daß sie nicht mehr eine symmetrische Kurve, wie die Sinuskurve ist, sondern daß sie durch die Ordinate des Maximalwertes in zwei ungleiche Teile geteilt wird. Unter solchen Umständen hat natürlich die abgeleitete Formel des effektiven Mittelwertes keine Giltigkeit, man muß vielmehr für jeden besonderen Fall den Zusammenhang des Maximal- und des Effektivwertes aus der aufgenommenen Kurve rechnerisch bestimmen.

Ein anderer Umstand ist auch zu erwägen. Es ist einleuchtend, daß die Phasenverschiebung zwischen zwei Kurven nur dann konstant sein kann, wenn diese Kurven völlig gleichförmig sind. In unserem Falle also, in welchem die Spannungskurve eine Sinuslinie, die Stromkurve dagegen eine verzerrte Linie ist, kann die Konstanz der Phasenverschiebung nicht bestehen und in diesem Falle kann die Phasendifferenz nicht als der Phasenunterschied zweier benachbarter Maximal- oder Nullwerte definiert werden.

Trotz alledem ist auch bei verzerrten Wellenformen der Ausdruck des elektrischen Effektes der folgende:

$$W = e\,i\,\cos\varphi$$

also derselbe, wie bei sinusförmigen Veränderungen. Der Unterschied besteht darin, daß man jetzt unter e und i die effektiven Werte der verzerrten Kurvenformen versteht und $\cos\varphi$ auch ein Faktor ist, der sich von dem bisher besprochenen wesentlich unterscheidet.

Digitized by Google

Hat man nämlich mit einem Wechselstrom beliebiger Kurvenform zu tun, kann man mit Hilfe eines Wattmeters immer den elektrischen Effekt messen. Dasselbe steht für die Spannung und die Stromstärke, so daß der Leistungsausdruck

$$W = e\,i\cos\varphi$$

so betrachtet werden kann, als die Leistung eines Sinusstromes, der die konstante Phasenverschiebung φ hat. Die verzerrten Kurven werden also durch Sinuskurven ersetzt, welche denselben effektiven Spannungs- und Stromstärkewert haben, wie die wirklichen Kurven und welche eine Phasenverschiebung besitzen, die der Bedingung entspricht, daß die aus den Sinuskurven berechnete Leistung die oben angegebene bleibt.

Diese Kurven nennt man äquivalente Sinuskurven, weil ihre effektiven Werte den effektiven Werten der verzerrten Kurvenformen entsprechen, den Cosinus des Phasenverschiebungswinkels dieser Sinuskurven aber nennt man Leistungsfaktor, da von seinem Werte die Leistung des Wechselstromes abhängt.

Sind demnach für die äquivalenten Sinuskurven die effektiven Werte e_s und i_s, dann muß

$$e_s = e$$

und

$$i_s = i$$

oder die Maximalwerte

$$E_s = \sqrt{2}\,e$$

beziehungsweise

$$J_s = \sqrt{2}\,i$$

sein.

Der Wert des Leistungfaktors ergibt sich daraus, daß man die Leistung, die Stromstärke

und die Spannung des Wechselstromes mißt und $cos\,\varphi$ aus der Gleichung

$$\frac{W}{e\,i} = \frac{e\,i\,cos\,\varphi}{e\,i} = cos\,\varphi$$

bestimmt.

In der Praxis hat man mit verschiedenen Wellenformen zu tun. Die Wellenform eines Wechselstromes hängt von der Konstruktion des

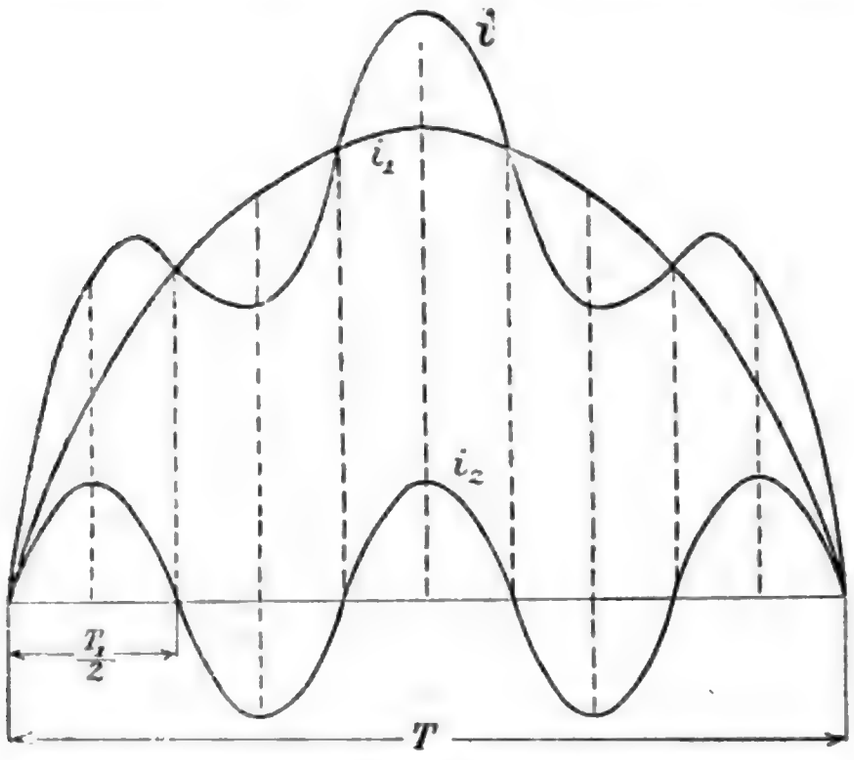


Fig. 61.

Generators ab. Die Verhältnisse der Dimensionen der Polschuhe und Eisenkerne des Magnetrades und der Armatur, der Luftzwischenraum, Form und Dimension der Nuten sind alle Faktoren, welche die Form der Strom- und Spannungswellen beeinflussen.

Fourier bewies, daß man eine beliebige Wellenform in eine Reihe von Sinus- und Cosinusgliedern zerlegen kann, und man bedient sich auch bei zusammmengesetzten Wellenformen dieses Verfahrens.

Digitized by Google

Seien zwei Wellenformen gegeben, welche zusammen eine resultierende Welle erzeugen. Die Gleichungen dieser Sinuswellen seien

$$I \qquad i_1 = J_1 \sin \omega t$$

und

$$II \qquad i_2 = J_2 \sin 5\,\omega t.$$

Die Momentwerte können ohne weiteres algebraisch summiert werden, weshalb der entsprechende

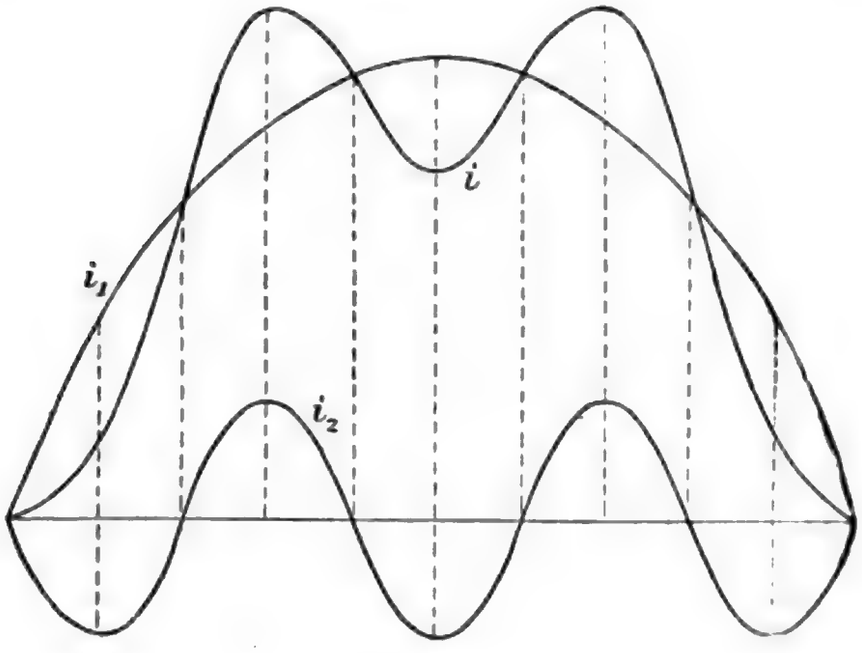


Fig. 62.

Momentwert des resultierenden Stromes

$$i = i_1 + i_2 = J_1 \sin \omega t + J_2 \sin 5\,\omega t$$

sein wird.

Fig. 61 zeigt uns den Zusammenhang zwischen der Grundwelle und der resultierenden Welle. In dieser Figur fängt sowohl i_1, als auch i_2 mit positiven Werten an; der Unterschied zwischen beiden Wellen ist nur der, daß die zwei Sinuslinien verschiedener Ordnung sind und verschiedene Maximalwerte haben, jedoch verändern sich beide nach dem Sinusgesetze.

Die resultierende Welle ist mit i bezeichnet, ihr Maximalwert ist der algebraischen Summe der Komponentmaximalwerte gleich.

Die Veränderung der einen Komponentwelle zieht die Veränderung der resultierenden Welle nach sich. Dieser Einfluß ist in Fig. 62 dargestellt. Jetzt fängt i_1 mit positiven, i_2 mit negativen Werten an, die resultierende Welle ist i, die wie ersichtlich wesentlich anders ist, als diejenige in Fig. 61.

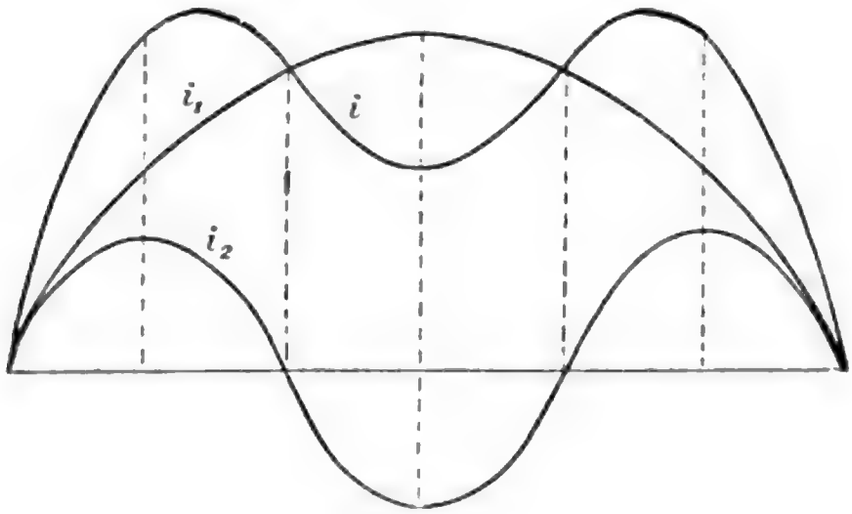


Fig. 63.

Wenn die Gleichung des einen Stromes

$$i_1 = J_1 \sin \omega t$$

ist, dann muß laut obiger Auseinandersetzung

$$i_2 = -J_2 \sin 5\,\omega t$$

sein.

Die resultierende Stromstärke demnach:

$$i = i_1 + i_2 = J_1 \sin \omega t - J_2 \sin 5\,\omega t.$$

wenn $t = 0$, wird $i = 0$ und bei $t = \frac{5}{4} T_1 = \frac{T}{4}$ wobei T_1 und T die Perioden der zwei Komponentwellen sind, wird i maximal. Wenn nämlich $t = \frac{5}{4} T_1$

Digitized by Google

und $T = 5\ T_1$ aus obiger Gleichung, dann wird:

$$i_1 = J_1 \sin \omega t = J_1 \sin \frac{2\pi}{5\ T_1} \frac{5}{4} T_1$$

$$i_1 = J_1 \sin \frac{\pi}{2} = J_1.$$

Ferner:

$$i_2 = J_2 \sin 5 \frac{2\pi}{5\ T_1} \frac{5}{4} T_1$$

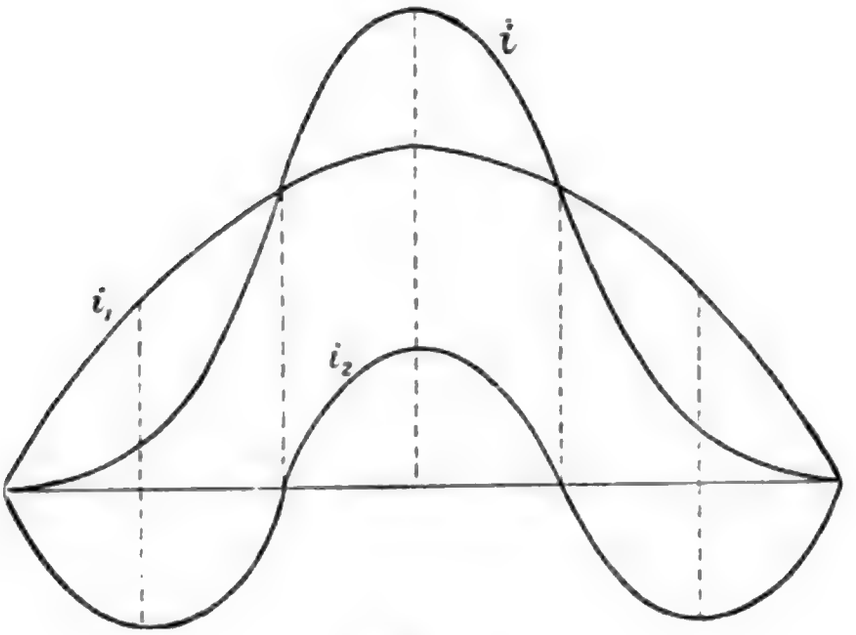


Fig. 64.

d. h.

$$i_2 = J_2 \sin \frac{5}{2} \pi = J_2 \sin \frac{\pi}{2} = J_2.$$

Nachdem i_1 und i_2 entgegengesetzte Vorzeichen haben, wird der Maximalwert des resultierenden Stromes

$$J = J_1 - J_2$$

sein.

Wenn eine Sinuskurve mit einer Sinuskurve dritter Ordnung zusammengesetzt wird, dann sind die resultierenden Kurven von den jetzigen verschieden. Die Verhältnisse für diese Fälle sind in den Figuren 63 und 64 dargestellt.

Digitized by Google

Die Stromgleichungen sind:
Für Fig. 63:

$$i_1 = J_1 \sin \omega t$$

$$i_2 = J_2 \sin 3\,\omega t$$

und

$$i = J_1 \sin \omega t + J_2 \sin 3\,\omega t.$$

Für Fig. 64 ist in Betrachf zu ziehen, daß die eine Kurve mit positiven, die andere mit negativen

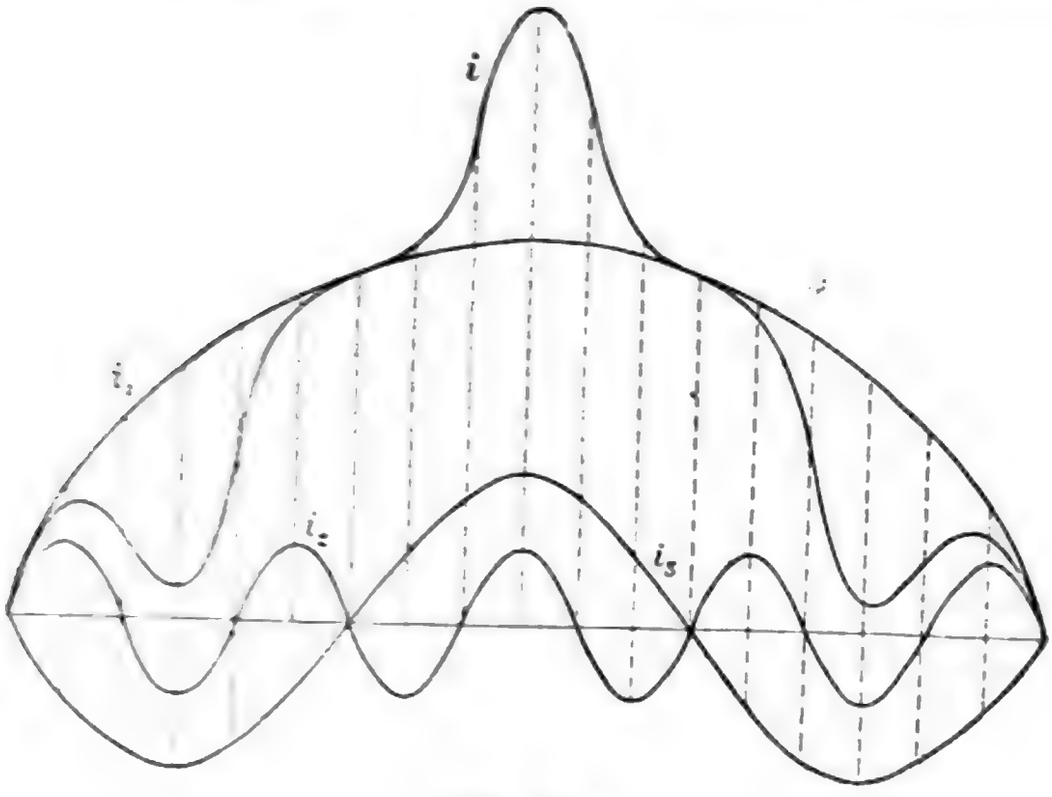


Fig. 65.

Werten anfängt, weshalb die Vorzeichen der beiden Gleichungen entgegengesetzt genommen werden müssen, d. h. wenn

$$i_1 = J_1 \sin \omega t$$

dann wird

$$-i_2 = -J_2 \sin \omega t$$

sein, und der resultierende Strom

$$i = i_1 + (-i_2) = J_1 \sin \omega t - J_2 \sin 3\,\omega t.$$

Digitized by Google

Nachdem die Form der resultierenden Welle von der Form der Komponentwellen abhängt, kann man mit Hilfe von Sinuswellen verschiedener Ordnung eine beliebig komplizierte Welle herstellen und eine beliebige Welle in ihre Komponenten zerlegen. Die Fig. 65 bis 69 zeigen verschiedene Kombinationen von resultierenden Wellen.

Die Bedingungsgleichungen werden in diesen Fällen folgende sein:

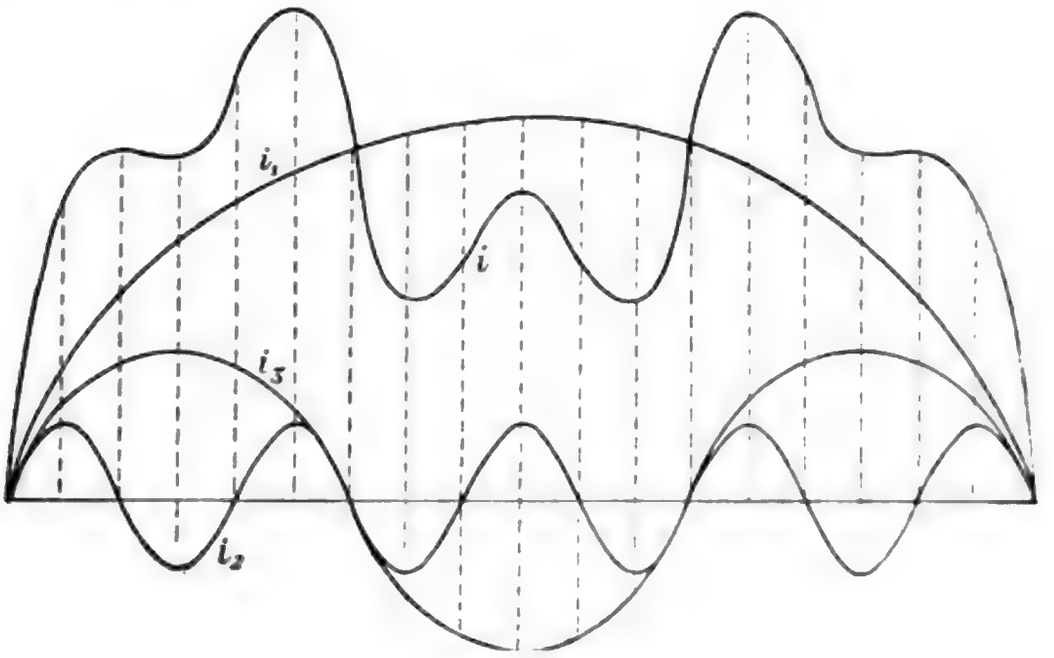


Fig. 66.

Für Fig. 65:

$$i_1 = J_1 \sin \omega t$$

$$i_2 = J_2 \sin 9\, \omega t$$

und

$$-i_3 = -J_3 \sin 3\, \omega t.$$

Aus diesen drei Gleichungen wird die resultierende Stromstärke

$$i = i_1 + i_2 - i_3$$

sein, oder

$$i = J_1 \sin \omega t + J_2 \sin 9\, \omega t - J_3 \sin 3\, \omega t.$$

Bei Figur 66 sind die Komponentwellen dieselben, nur fangen alle mit positiven Werten an. Es wird also außer i_1 und i_2 auch i_3 positiv und der Momentwert der resultierenden Stromstärke wird:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

d. h.

$$i = J_1 \sin \omega t + J_2 \sin 9\,\omega t + J_3 \sin 3\,\omega t.$$

Während bei Fig. 65 die resultierende Kurve spitziger ist, als diejenigen von i_1, i_2 und i_3, da bei

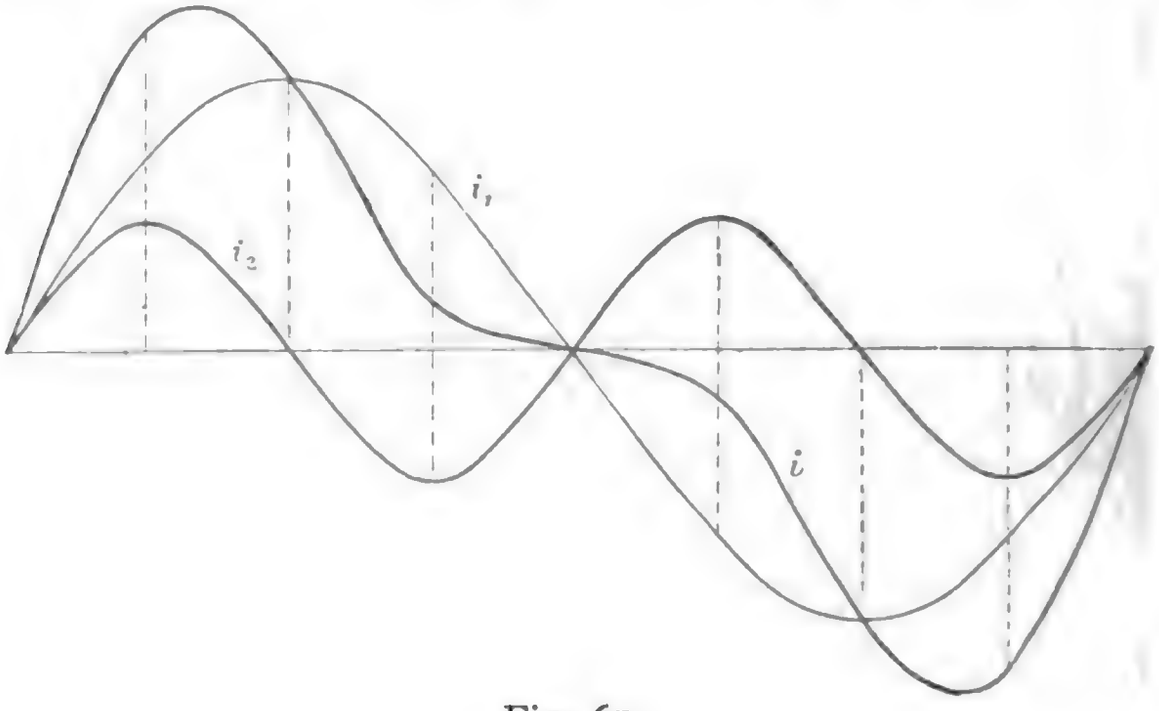


Fig. 67.

dem Maximalwert des letzteren die Summe der einzelnen Maximalwerte genommen wurde, ist bei Fig. 66 das entgegengesetzte zu konstatieren. In diesem Falle ergibt sich nach $\frac{T}{2}$ Perioden, in welchen alle drei Maximalwerte vorhanden sind, eine Differenz den Maximalwert der resultierenden Stromstärke, folglich muß dies Maximum kleiner als der frühere sein. Immerhin finden sich aber, wie aus Fig. 66 ersichtlich, zwei andere Maximalwerte, welche größer als der zuvor Besprochene sind.

Digitized by Google

Bei Fig. 67 sind zwei Wellen addiert, welche verschiedene Ordnungszahlen haben, weiters sind diese Zahlen ungleichförmig, d. h. eine Welle hat eine ungerade, die andere eine gerade Ordnungszahl. Dasselbe ist der Fall bei den Fig. 68 und 69, wobei einmal die Ströme im gleichen Sinn, das anderemal aber im einander entgegengesetzten Sinn fließen.

Für die letzten drei Fälle werden die Gleichungen:

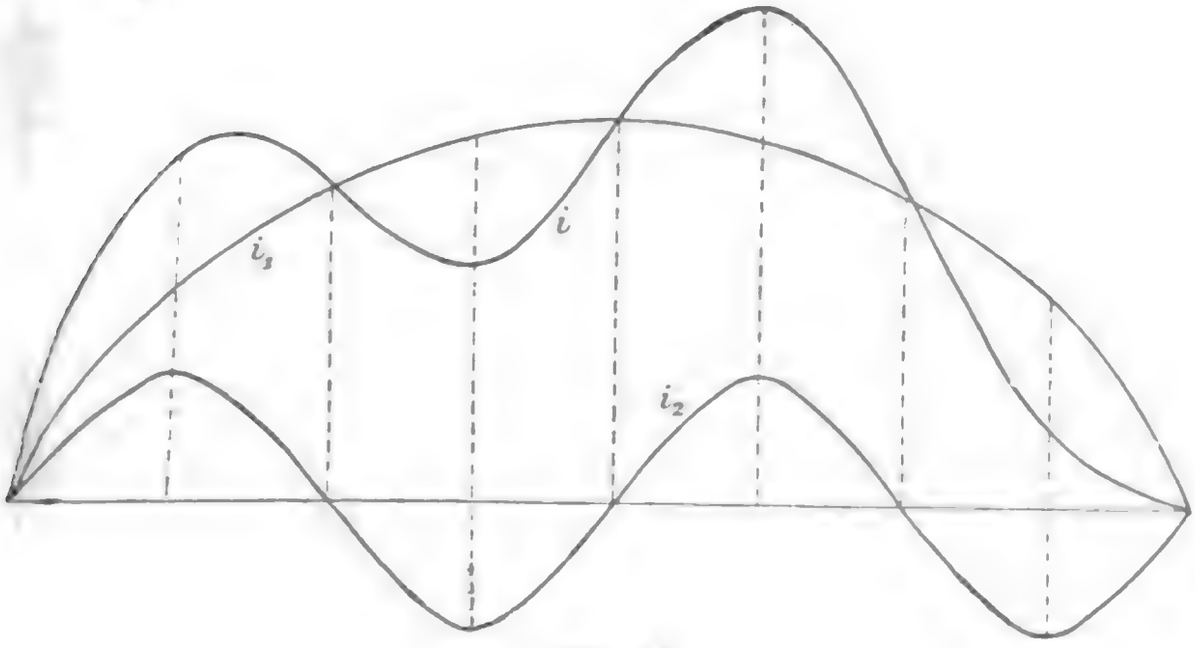


Fig. 68.

$$i_1 = J_1 \sin \omega t$$

$$i_2 = J_2 \sin 2\,\omega t$$

und

$$i = J_1 \sin \omega t + J_2 \sin 2\,\omega t$$

beziehungsweise

$$i_1 = J_1 \sin \omega t$$

$$i_2 = J_2 \sin 4\,\omega t$$

$$i = J_1 \sin \omega t + J_2 \sin 4\,\omega t.$$

Endlich

$$i_1 = J_1 \sin \omega t$$

$$-i_2 = -J_2 \sin 4\,\omega t$$

und

$$i = J_1 \sin \omega t - J_3 \sin 4 \omega t$$

sein.

Betrachtet man unsere bisherigen Ergebnisse und Diagramme eingehender, dann findet man, daß die Symmetrie der resultierenden Kurvenform zu gewissen Bedingungen gebunden ist.

Werden zwei oder mehrere Wellen zu einer Welle zusammengesetzt, bekommt man symmetrisch zum Maximalwerte liegende Kurven nur dann

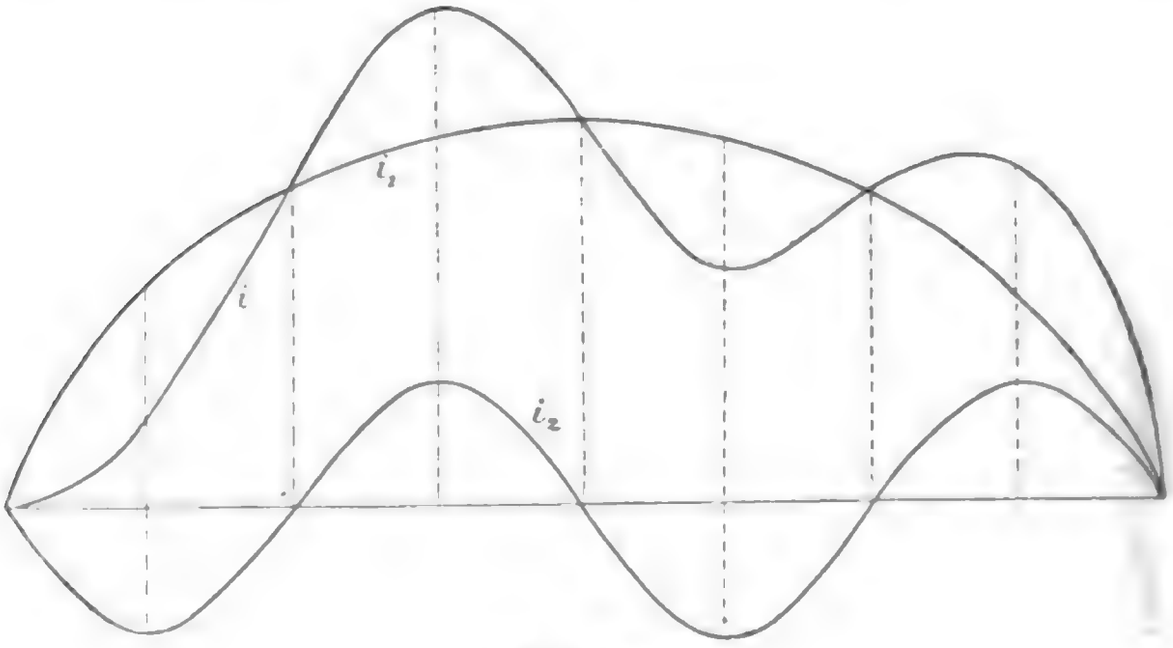


Fig. 69.

wenn die Komponentwellen alle ungerade Ordnungszahlen haben. Im entgegengesetzten Falle, in welchem also die Ordnungszahlen der Wellen gerade und ungerade sind, erhält man in bezug auf den Maximalwert unsymmetrisch liegende resultierende Wellen.

Sind die Komponentwellen nicht in Phase miteinander als bisher, dann hat auch die resultierende Welle zu beiden Komponentwellen eine Phasenverschiebung. Die Größe dieser Phasenverschiebung hängt von den Phasenverhältnissen der Komponentwellen ab. In Fig. 70 sind solche

Digitized by Google

Wellenkomponente, sowie auch die resultierende Welle dargestellt.

Die Komponentwellen sind i_1 und i_2, die resultierende Welle i. Nachdem i_1 und i_2 in ihren Phasen gegeneinander verschoben sind, wird auch i zu den Komponentwellen eine Phasendifferenz haben, und zwar eilt i der Welle i_1 in der Phase vor, und bleibt in bezug auf i_2 in der Phase zurück.

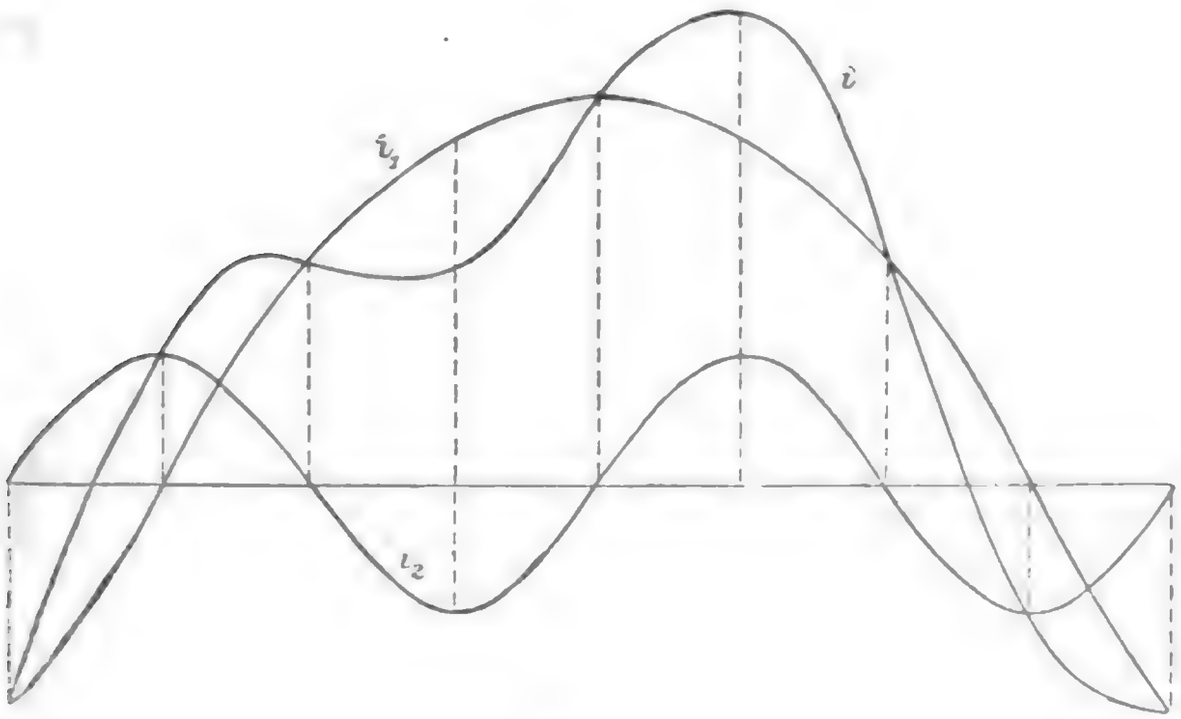


Fig. 70.

Arithmetische, effektive Mittelwerte bei zusammengesetzten Wellenformen. Der Scheitelfaktor.

Wie aus dem Vorhergesagten bekannt, ist der arithmetische Mittelwert einer periodisch veränderlichen Größe durch die Höhe eines Parallelogrammes gegeben, dessen Flächeninhalt gleich mit der durch die Kurve und der Abscissenachse in bezug auf eine halbe Periode umschlossenen Fläche und dessen Länge durch die halbe Periode der Kurve gegeben ist.

Bei sinusförmigen Veränderungen ist der Momentwert in jedem Zeitpunkte durch die Gleichung

$$x = X \sin \omega t$$

gegeben.

Der arithmetische Mittelwert läßt sich nach der auf Seite 51 angeführten Weise als

$$x_m = \frac{2}{\pi} X$$

ausdrücken, wo X den Maximalwert bedeutet.

Die zusammengesetzten Wellenformen lassen sich, wie gezeigt, in eine Anzahl von Sinus- und Cosinusgliedern zerlegen, wir können also auch in solchen Fällen den arithmetischen Mittelwert berechnen.

Sei uns eine periodisch veränderliche Größe durch die Gleichung

$$i = J_1 \sin \omega t + J_2 \sin 3 \omega t$$

gegeben.

Der arithmetische Mittelwert wird:

$$i_m = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (J_1 \sin \omega t + J_2 \sin 3 \omega t)\, d t$$

sein, oder

$$i_m = \frac{2}{\pi} J_1 + \frac{2}{3\pi} J_2.$$

Der Ausdruck des soeben gefundenen Mittelwertes enthält Faktoren, die von den Komponentgleichungen der zur zusammengesetzten Wellenform gehörenden Gleichung abhängen, weshalb für den arithmetischen Mittelwert keine allgemeine Formel gefunden werden kann. Dieser Wert ist von Fall zu Fall besonders zu berechnen.

Digitized by Google

Vom letzten Ausdrucke läßt sich der Mittelwert für jenen Fall bestimmen, in welchem man mit einer gewöhnlichen Sinuskurve zu tun hat. In diesem Falle ist nämlich nur das erste Glied in Betracht zu ziehen, da die Grundgleichung

$$i = J_1 \sin \omega t$$

ist und dementsprechend wird der arithmetische Mittelwert für diesen speziellen Fall

$$i = \frac{2}{\pi} J_1$$

sein.

Das Ergebnis ist für den Effektivwert der zusammengesetzten Wellenform ein wesentlich anderes. Der Effektivwert ist bekanntlich die Quadratwurzel aus dem Mittelwerte der Quadrate aller Momentwerte, d. h. bei gewöhnlicher Sinuskurve:

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i^2 \, dt}.$$

Ist für einen beliebigen Zeitpunkt

$$i = J \sin \omega t$$

dann wird

$$i_{eff} = \frac{J}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \, J$$

sein.

Sei die Gleichung einer beliebigen Wellenform

$$i = J_1 \sin \omega t + J_2 \cos \omega t.$$

Ein Glied dieser Gleichung kann umgewandelt werden, denn es ist im allgemeinen:

$$\cos \alpha = \sin (90 + \alpha)$$

und demnach

$$i = J_1 \sin \omega t + J_2 \sin (90 + \omega t).$$

Der Ausdruck des Effektivwertes ist:

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (J_1^2 \sin^2 \omega t + J_2^2 \sin^2 [90 + \omega t])\, dt}.$$

Hieraus bekommt man, daß:

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2} (J_1^2 + J_2^2)}$$

Bei gewöhnlicher Sinuskurve ist $J_2 \cos \omega t = 0$, und deshalb

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2} J_1^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} J_1 = 0{,}707\, J_1.$$

Man kann auch eine ganz allgemeine Gleichung für den Effektivwert einer beliebig zusammengesetzten Wellenform aufstellen. Ist nämlich die Gleichung der fraglichen Wellenform folgende:

$$i = J_1 \sin \omega t + J_2 \cos \omega t + J_3 \sin 3\omega t + J_4 \cos 3\omega t + \ldots$$

dann wird der allgemeine Ausdruck lauten:

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2} (J_1^2 + J_2^2 + J_3^2 + J_4^2 \ldots)}.$$

Wir sehen also, daß der effektive Mittelwert von der Wellenform unabhängig ist und daß nur die Maximalwerte auf seinen Wert von Einfluß sind. Obige Formel läßt sich also auf jede beliebige Wellenform anwenden.

Nachdem wir nun alle Begriffe mit Bezug auf zusammengesetzte Wellenformen verallgemeinert

Digitized by Google

haben, untersuchen wir auch den Formfaktor für diese Fälle.

Der Formfaktor gibt das Verhältnis zwischen dem effektiven und dem arithmetischen Mittelwerte, d. h.

$$f = \frac{i_{eff}}{i_m}.$$

Für gewöhnliche Sinuskurven ist

$$i_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} J_{max} \text{ und } i_m = \frac{2}{\pi} J_{max}$$

so daß

$$f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11$$

wird.

Bei spitzen Kurvenformen ist f größer, bei stumpfen kleiner als der obige Wert.

Der Formfaktor gibt nur dann richtige Werte, wenn die Kurve symmetrisch ist, d. h. wenn die Ordinate des Scheitelwertes die Kurve in zwei symmetrische Teile teilt.

Für komplizierte Wellenformen bedient man sich nicht des Formfaktors, sondern des sogenannten Scheitelfaktors, da letzterer über die Spitzheit oder Stumpfheit der Welle Aufklärung gibt. Unter Scheitelfaktor versteht man das Verhältnis des Scheitelwertes zum Effektivwert:

$$s = \frac{J_{max}}{i_{eff}}.$$

Je spitzer die Kurve, um so größer J_{max} im Verhältnis zu i_{eff}, also um so größer der Wert s. Bei gewöhnlicher Sinuskurve ist

$$i_{eff} = \frac{J_{max}}{\sqrt{2}}.$$

Digitized by Google

Folglich

$$s = \frac{J_{max}}{\frac{J_{max}}{\sqrt{2}}} = \sqrt{2} = 1{,}414.$$

Ist eine zusammengesetzte Wellenform gegeben, dann bestimmt man in beliebiger Weise J_{max}, berechnet i_{eff} und durch Bildung des Verhältnisses beider den Scheitelfaktor. Am schnellsten und bequemsten ist zumeist jenes Verfahren, nach welchem man aus den gegebenen Komponentwellen oder aus Experimenten die Kurvenform zeichnet und den Scheitelwert abmißt. Der effektive Wert kann nun berechnet oder auch aus dem Diagramm bestimmt werden, wodurch der Wert des Scheitelfaktors völlig bestimmt ist.

VII. Kapitel.

Über das Messen von Wechselströmen.

Obwohl das Messen überhaupt konstante oder wenigstens nahezu konstante Größen bedingt, kann auch bei Wechselgrößen vom Messen die Rede sein, wenn diese Wechselgrößen einer Bedingung genüge leisten. Diese Bedingung ist die, daß die Veränderungen der Wechselgrößen sich periodisch erneuern, daß nämlich die Wechselgrößen durch periodische Funktionen der Zeit ausgedrückt werden können. Für Wechselströme trifft dies zu, denn die Wechselströme verlaufen entweder nach einer Sinuskurve, dann ist ihre Veränderung eine völlig symmetrische, oder nach einer beliebigen Kurvenform, welche zwar asymmetrisch ist, doch welche ständig dieselbe Form zeigt. Diese Bedingung hat zur Folge, daß die meßbaren Wirkungen einen konstanten Charakter annehmen, ebenso wie die Gleichstromwirkungen. Beim Gleichstrome ist die wirkende elektromotorische Kraft konstant; ist dann noch der Widerstand des Stromkreises auch konstant, dann fließt eine Stromstärke durch den Stromkreis, dessen Größe von den obengenannten zwei Faktoren abhängt und welche konstant bleibt, solange beide Faktoren unverändert sind. Die Veränderung eines Faktors zieht auch eine Veränderung der Stromstärke nach sich, doch bleibt die Strom-

stärke auch dann konstant, wenn beide Größen in entsprechendem Maße zu- oder abnehmen.

Für den Gleichstromkreis besteht der Zusammenhang, daß

$$i = \frac{e}{r}$$

wenn e die wirksame elektromotorische Kraft, i die Stromstärke und r den Widerstand des Stromkreises bedeutet.

Bei konstantem Widerstande wird i um so größer, je größer die elektromotorische Kraft ist, oder umgekehrt bei konstanter elektromotorischer Kraft kann die Stromstärke nur dadurch erhöht werden, daß man den Widerstand des Stromkreises verringert.

Auch bei Wechselströmen besteht obiger Zusammenhang, mit dem Unterschiede, daß unter e und i eine elektromotorische Kraft und Stromstärke zu verstehen ist, welche sich als Mittelwerte der betreffenden Wechselgrößen ergeben. Die Meßapparate stehen zwar unter dem Einflusse aller Momentwerte der veränderlichen Größe, können aber infolge ihrer Trägheit nur einen gewissen Mittelwert aller Impulse anzeigen, welcher dann als Meßwert zu betrachten ist und welche zu den Maximalwerten in bestimmtem Verhältnisse stehen.

Bevor wir zur Beschreibuug der Meßanordnungen übergehen, wollen wir einige Meßapparate betrachten und ihre Wirkungsweise untersuchen.

Was zunächst die Meßinstrumente der elektromotorischen Kraft für Wechselstromkreise betrifft, unterscheidet man zwei Hauptgruppen, je nachdem der Spannungsmesser vom Strome durchflossen wird oder nicht.

Fließt kein Strom durch das Meßinstrument, sondern ist die Ablenkung lediglich durch die Wirkung elektrischer Massen aufeinander hervor-

gerufen, dann hat man mit einem elektrostatischen Instrument zu tun. Bei solchen elektrostatischen Spannungsmessern stehen fixe und bewegliche Metallflächen einander gegenüber, diese werden mit der Stromquelle verbunden, wodurch sie eine gewisse elektrische Ladung annehmen. Zwischen den Platten wirkt dann eine anziehende oder bei geeigneter Schaltung abstoßende Kraft, deren Größe von den Elektrizitätsmengen und von der gegenseitigen Entfernung der Metallplatten abhängt. Dadurch kommt der bewegliche Teil des Apparates in Bewegung, die Bewegung dauert aber nur solange, bis eine Gegenkraft, z. B. eine Torsionskraft mit der ursprünglich wirkenden Kraft das Gleichgewicht hält.

Elektrostatische Voltmeter zeigen immer den wahren Wert der Spannungsdifferenz an, da durch das Anlegen des Instrumentes an die Stromquelle oder an zwei Punkte des Stromkreises im Instrument selbst keine Strömung zustande kommt und dadurch kein Spannungsabfall verursacht wird.

Wesentlich anders sind die Verhältnisse bei Meßinstrumenten, welche auf elektromagnetischer, elektrodynamischer oder auf der Wärmewirkung des Stromes beruhen. Bei diesen muß immer Strom durch das Meßinstrument fließen, denn sonst kann keine der erwähnten Wirkungen entstehen. Diese Stromstärke verursacht aber im Stromkreise einen Spannungsabfall, weshalb die angezeigte Spannungsdifferenz nicht mehr die ursprüngliche, sondern eine kleinere ist. Will man die vorhanden gewesene Spannungsdifferenz kennen, dann muß man den verursachten Spannungsabfall berechnen und den so erhaltenen Wert zur gemessenen Spannungsdifferenz addieren.

Die auf elektromagnetischer Wirkung beruhenden Spannungsmesser haben eine Drahtspule mit vielen Windungen von dünnem Drahte, die

Spule ist hohl und in dem Hohlraume spielt ein aufgeschlitztes und excentrisch gelagertes Stück aus Weicheisenblech. Durch die excentrische Anordnung kommt das Blechstück näher der inneren Spulenwand zu liegen, ist darum magnetischen Anziehungen ausgesetzt, sobald Strom durch die Spule fließt. Je stärker der Strom, d. h. je größer die Spannungsdifferenz zwischen den Endpunkten der Spulenbewicklung ist, um so stärker wird das

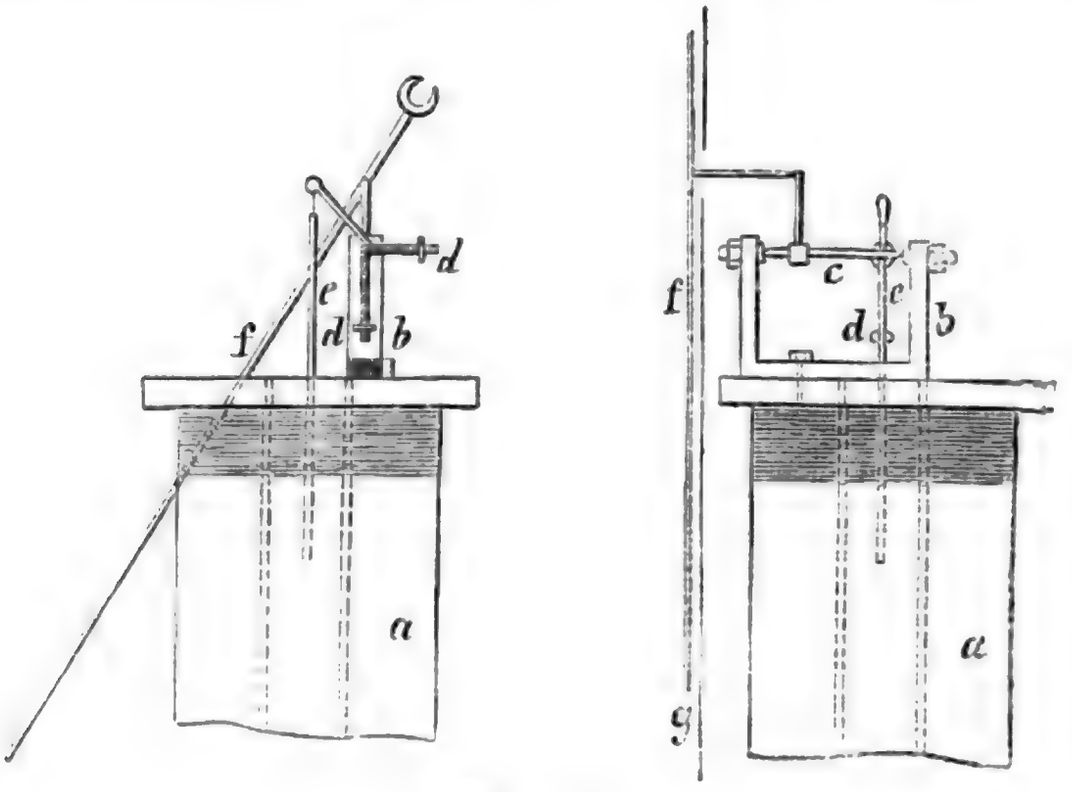


Fig. 71.

magnetische Feld und um so größer wird die Ablenkung des Zeigers des Spannungsmessers sein.

In Fig. 71 ist ein auf elektromagnetischer Wirkung beruhender Spannungsmesser schematisch dargestellt, der Unterschied vom Vorherbeschriebenen besteht nur darin, daß jetzt das Weicheisenblech durch einen in die Spule hineinhängenden Eisenkern ersetzt ist, welcher um so mehr in die Spule hineingezogen wird, je größer die zu messende Spannungsdifferenz ist.

Digitized by Google

Die Spannungsdifferenz kann außerdem noch mit Hilfe der elektrodynamischen Wirkung der elektrischen Ströme gemessen werden. Bei den auf diesem Prinzipe beruhenden Apparaten sind zwei hohle Drahtspulen vorhanden, deren eine fix, die andere aber beweglich und mit einem über eine Skalenteilung spielenden Zeiger verbunden ist. Ein solcher Apparat ist aus Fig. 72 ersichtlich.

Die beiden Spulen sind zumeist senkrecht aufeinander. Fließt ein Strom durch ihre Windungen, dann trachten sie in gegeneinander parallele Lagen zu kommen. Die Wirkung ist um so größer, je größer die Stromstärke oder je größer die zu messende Spannungsdifferenz ist. Die Gleichgewichtslage wird durch die Gravitationskraft, durch die Torsionskraft einer Feder etc. hergestellt.

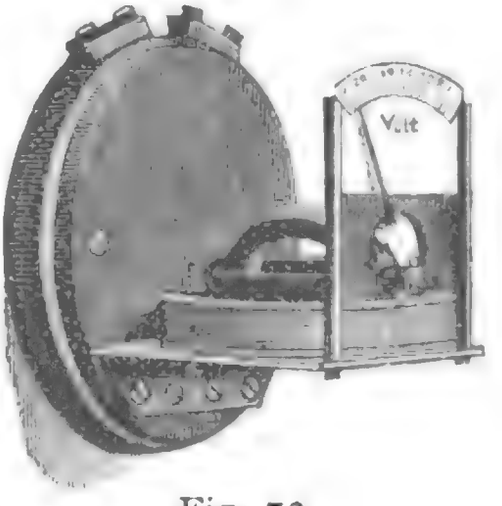


Fig. 72.

Endlich müssen noch die Hitzdrahtinstrumente erwähnt werden. Bei diesen fließt der Strom durch einen dünnen Draht, welcher dadurch erwärmt wird und sich ausdehnt. Diese Längenveränderung wird in entsprechender Weise auf einen Zeiger übertragen, der außerdem noch mit einer Feder verbunden ist. Diese Feder bewirkt, daß der sich erwärmende Draht immer straff ausgezogen ist und daß der Zeiger nach Ausschalten des Instrumentes wieder in seine Nullage zurückgebracht wird.

Die bisher besprochenen Ausführungen gelten auch für die Strommesser der Wechselstromkreise. Man kann zur Stromstärkenmessung ein elektrostatisches Instrument benutzen, welches für diesen Fall mit einem Nebenschluß versehen ist, der in den Hauptstromkreis geschaltet wird und den zu

Digitized by Google

messenden Strom führt. Zwischen den Endpunkten des Nebenschlusses entsteht also eine Potentialdifferenz, welche um so größer ist, je größer die im Kreise fließende Stromstärke wird. Dementsprechend zeigt das elektrostatische Instrument, welches zu den Endpunkten des Nebenschlusses parallel geschaltet ist, diese Potentialdifferenz an, und man kann aus der Ablenkung des Zeigers auf jene Stromstärke schließen, welche im Nebenfluß fließt. Das Instrument ist auch dementsprechend geeicht, so daß man durch die Ablesung sofort den Wert der Stromstärke bekommt.

Dieses Verfahren ist also eine indirekte Bestimmung der Stromstärke durch Spannungsmessung.

Bei direkten Strommessungen benutzt man die auf elektromagnetischer, elektrodynamischer oder auf die Wärmewirkung des Stromes beruhenden Apparate ebenso wie bei der Spannungsmessung. In der Ausführung der Meßinstrumente muß man in Betracht ziehen, daß zumeist der Gesamtstrom durch den Meßapparat fließt und müssen deshalb dicke Leiter verwendet werden. Bei allzugroßen Stromstärken müßte man Leiter mit beträchtlichen Querschnitten anwenden, welcher Umstand einerseits die Dimensionen des Apparates, anderseits wieder die Herstellungskosten desselben vergrößern würde. Für die Messung großer Stromstärken verwendet man daher auch hier Nebenschlüsse, so daß nur ein Teil des Gesamtstromes durch den Meßapparat fließt und dessen beweglichen Teil beeinflußt. Nachdem zwischen den Widerständen dieser zwei parallel geschalteten Stromkreise (dem Meßapparate und dem Nebenschlusse) und den in ihnen fließenden Stromstärken ein bestimmter Zusammenhang besteht, kann man das Instrument so eichen, daß es direkt die im Hauptstromkreise fließende Stromstärke abzulesen gestattet.

Ein technisches Meßinstrument, welches in der Praxis sehr oft verwendet wird, ist das Elektrodynamometer. Dieses Instrument dient zur Bestimmung der Stromstärke und beruht auf der

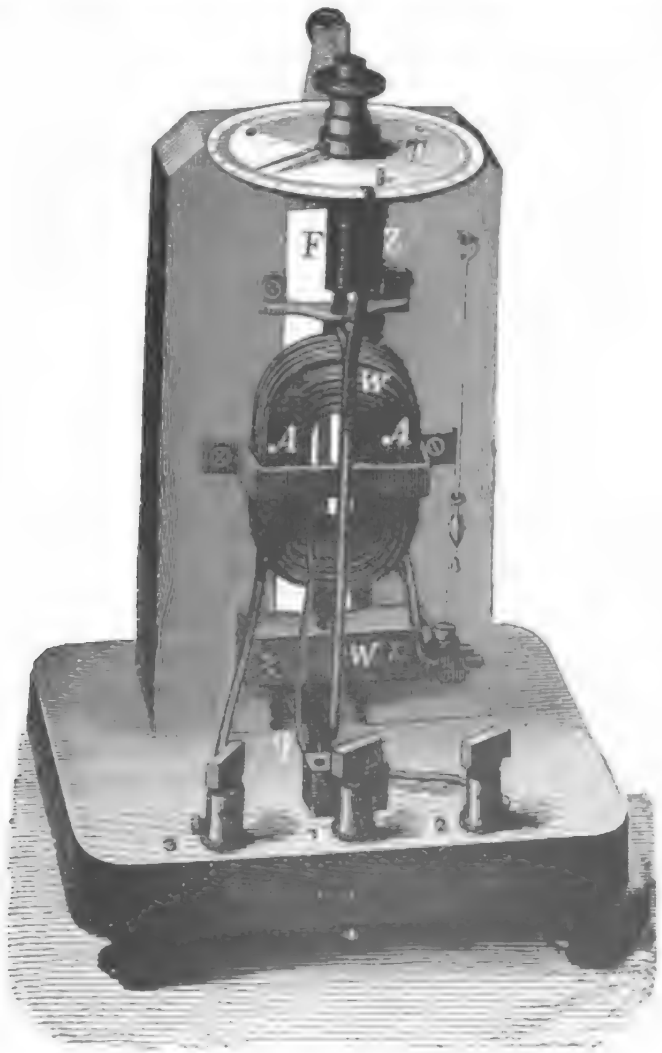


Fig. 73.

elektrodynamischen Wirkung des Stromes. Sie besteht, wie aus Fig. 73 ersichtlich, aus einer fixen und einer beweglichen Spule, deren Ebenen senkrecht aufeinander stehen. Die bewegliche Spule besteht hier aus einer einzigen Windung, weil dieser Apparat zur Messung großer Stromstärken

dient, sie kann aber durch Vermehrung der Windungszahlen der Spulen mit beliebiger Empfindlichkeit versehen werden. Die bewegliche Spule ist auf einen Seidenfaden aufgehängt und mit einer Torsionsfeder F versehen, welche mit einem Torsionskopfe verbunden ist. Der Torsionskopf trägt einen Zeiger, der über eine Kreisteilung T schleift, mit dessen Hilfe man den Torsionswinkel, welcher der Torsionsfeder erteilt worden ist, ablesen kann. Außerdem ist die bewegliche Spule mit einem als Zeiger dienenden leichten Arme versehen, dessen Ende über den Nullpunkt der Kreisteilung T spielt. Um die Stromzuführung zur beweglichen Spule zu ermöglichen, tauchen beide Enden derselben in Quecksilbernäpfchen, welche mit der weiteren Stromleitung in Verbindung stehen.

Die fixe Spule besteht aus zwei Abteilungen, welche durch geeignete Schaltungsanordnung verschieden geschaltet werden können. Entweder benutzt man beide Abteilungen in Serie geschaltet oder nur eine allein, und dementsprechend kann man das Instrument zum Messen verschieden starker Ströme verwenden.

Beim Messen von Wechselstromstärken benutzt man das Instrument in der Weise, daß man es in den Hauptstromkreis schaltet. Nachdem die feste und die bewegliche Spule nacheinander geschaltet sind, fließt dieselbe Stromstärke durch die beiden Spulen und die Ablenkung wird mit dem Quadrate der zu messenden Stromstärke proportional. Ist daher die Stromstärke i und der Torsionswinkel, der der Spiralfeder erteilt werden muß, um den Zeiger der beweglichen Spule in die Nullage zurückbringen zu können, α, dann wird

$$i^2 = c\,\alpha$$

oder

$$i = \sqrt{c\,\alpha} = c_1\sqrt{\alpha}$$

sein, wo c_1 die Konstante des Elektrodynamometers bedeutet.

Bei jeder Messung muß der Torsionskopf solange verdreht werden, bis die erteilte Torsionskraft mit der ablenkenden elektrodynamischen Kraft das Gleichgewicht hält.

Die Elektrodynamometer müssen möglichst senkrecht stehen. Um dies erreichen zu können, sind die Apparate mit einem Senkblei versehen.

Zur Strommessung können auch Hitzdrahtinstrumente verwendet werden. Diese haben in der Regel einen Nebenschluß, da der sich ausdehnende Draht viel zu dünn ist, um größere Stromstärken, ohne Schaden zu nehmen, aushalten zu können. Die Einrichtung dieser Meßapparate stimmt übrigens mit der des Spannungsmessers überein.

Was die angezeigten Meßwerte betrifft, ist vor Augen zu halten, daß für Wechselströme alle Apparate, deren Ablenkung von der ersten Potenz des Stromes abhängt, arithmetische Mittelwerte, jene, deren Ausschlag von der zweiten Potenz abhängt, aber effektive Mittelwerte ergeben.

Demnach geben die auf elektromagnetischer Wirkung des Stromes beruhenden Apparate die mittlere Spannung oder Stromstärke an, die elektrostatischen, elektrodynamischen und Hitzdrahtinstrumente dagegen die entsprechenden effektiven Werte.

Leistungsmessung. Ist im Gleichstromkreise die gemessene Spannung zwischen zwei Punkten e und die den Leiterkreis durchfließende Stromstärke i, dann ist die Leistung des Gleichstromes zwischen den genannten zwei Punkten durch die Gleichung

$$w = e\,i$$

gegeben.

Im Wechselstromkreise sind die Verhältnisse anders. Wir sahen, daß die letzte Gleichung in

Digitized by Google

Wechselstromkreisen nur dann Giltigkeit hat, wenn Strom und Spannung miteinander in Phase sind und daß in diesem Falle e und i die gemessenen effektiven Spannungs-, beziehungsweise Stromwerte bedeuten.

Hat man daher eine Schaltungsdisposition, von welcher man weiß, daß keine Phasenverschiebung auftreten kann, ist z. B. der Stromkreis aus Glühlampen gebildet, dann genügt mit den vorher beschriebenen Instrumenten die effektive Spannung, beziehungsweise Stromstärke zu messen und die erhaltenen Meßwerte miteinander zu multiplizieren. Man erhält dann die Leistung des Wechselstromes in Watt.

In der Wechselstromtechnik ist aber dieser eben beschriebene Fall selten, und man hat gegewöhnlich mit größeren oder kleineren Phasendifferenzen zu rechnen. Bei Phasendifferenz ergäbe obiges Produkt für die Leistung des Wechselstromes einen größeren Wert als den, der der tatsächlichen Leistung entspricht, denn in solchen Fällen ist nur jene Komponente des Stromes mit der Spannung zu multiplizieren, welche in die Richtung des Spannungsvektors fällt, oder mit anderen Worten, die Leistung eines Wechselstromes bei gegebener Phasenverschiebung ergibt sich als ein Produkt, dessen einer Faktor die Spannung, der andere dagegen der Arbeits- oder Wattstrom ist.

Ist der fragliche Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung φ, dann ist bei i_t Gesamtstrom die Wattkomponente des Stromes

$$i_n = i_t \cos \varphi$$

und die Leistung des Wechselstromes bei gemessener e_t Gesamtspannung:

$$w = e_t i_n = e_t i_t \cos \varphi.$$

Digitized by Google

Hierbei sind e_t und i_t als effektive Werte einzusetzen.

Aus der letzten Gleichung ist ersichtlich, daß die Leistung eines Wechselstromes bei beliebig großen Spannungs- und Stromwerten Null ist, wenn die Phasenverschiebung eine Viertelperiode beträgt oder wenn $\varphi = 90^0$ ist. In diesem Falle wird $cos\,\varphi = 0$ und demnach auch $w = 0$.

Um die Leistung messen zu können, bedürfen wir eines Instrumentes, dessen Ablenkungswerte bei jeder Phasenverschiebung die gemessene Leistung angeben. Ein solches Instrument ist das Wattmeter, welches auf der elektrodynamischen Wirkung des Wechselstromes beruht ebenso, wie das Elektrodynamometer.

Das Wattmeter hat eine fixe und eine bewegliche Spule. Die fixe Spule, welche gewöhnlich aus zwei, miteinander in Serie schaltbaren Teilen besteht, wird in den Hauptstromkreis geschaltet, seine elektrodynamische Wirkung hängt also vom ungeteilten Strome ab.

Die auf einen Seidenfaden aufgehängte und mit einer Torsionsfeder versehene bewegliche Spule, die Spannungsspule, wird im Nebenschluß zu jenen zwei Punkten geschaltet, zwischen welchen man die Leistung messen will, also z. B. bei der Messung der Leistung eines Wechselstromerzeugers, an die Klemmen der Maschine.

Da man zumeist mit größeren Spannungen zu tun hat, und die Spannungsspule zwischen Punkte geschaltet wird, zwischen welchen diese größeren Potentialdifferenzen herrschen, so muß man noch einen größeren Vorschaltwiderstand benutzen, damit die Stromstärke im dünnen Drahte keine allzu großen Werte annimmt und dadurch die Spule zerstört.

Dieser Vorschaltwiderstand muß induktionsfrei sein, welche Bedingung für den ganzen Spannungsstromkreis möglichst zu erfüllen ist. Dies ist darum

nötig, weil bei induktionslosem Stromkreise der in diesem Stromkreis fließende Strom und die Spannung keine Phasenverschiebung erleiden, und dadurch ist erreicht, daß die elektrodynamische Wirkung der beweglichen Spule mit der wirkenden Spannung proportional ist.

Nachdem in der festen Spule der Hauptstrom, in der beweglichen Spule ein solcher Teilstrom fließt, der mit der Spannung in Phase ist, wird durch dieses Instrument die tatsächliche Leistung des Wechselstromes angegeben. Im Hauptstromkreise eintretende Phasenverschiebungen kommen auf die Indikationen des Meßinstrumentes dadurch zur Geltung, daß der Hauptstrom später oder früher seine Null- und Maximalwerte erreicht und dadurch auch in seinen dynamischen Wirkungen zurückbleibt oder voreilt.

Ist die Phasenverschiebung gleich mit einer Viertelperiode, dann kann überhaupt keine elektrodynamische Wirkung zustande kommen, denn in diesem Falle ist der Hauptstrom dann Null, als der Strom in der Spannungsspule ein Maximum wird und umgekehrt, und die bewegliche Spule verläßt überhaupt nicht ihre Ruhelage.

Die Spannungsspule hat immer eine gewisse Selbstinduktion, welche nicht vermieden werden kann. Ihren Einfluß kann man aber immerhin schwächen, wenn man möglichst wenig Windungen benutzt und den nötigen Widerstand separat in einem Widerstandskasten unterbringt. Diese additionellen Widerstände sind bifilar gewickelt, haben also keine Selbstinduktion.

Die Enden der beweglichen Spule tauchen ebenso wie bei dem Elektrodynamometer in Quecksilbernäpfe. Da aber der Teilstrom in der beweglichen Spule ein sehr schwacher ist, kann man anstatt der Quecksilbernäpfe, deren Anwendung mit vielen Unannehmlichkeiten verbunden ist, auch

feine Spiralen zur Stromführung benutzen. Die Firma Ganz & Co. in Budapest verwendet zu diesem Zwecke feine Silberspiralen, auch ist die bewegliche Spule nicht aufgehängt, sondern sie hat eine feste Achse, welche in Lagern mit möglichst geringer Reibung sich dreht. Die Schaltung der Teile der festen Spule wird bei dieser Ausführung mit Stöpselkontakten bewerkstelligt und man kann in bequemer Weise die Schaltungen vornehmen, ohne den Stromkreis unterbrechen zu müssen. Die bewegliche Spule ist so dimensioniert, daß der Strom in ihr bei normalen Verhältnissen nicht über 0,1 Ampère steigt. Dementsprechend muß der Gesamtwiderstand des Spannungskreises mindestens das Zehnfache jenes Spannungswertes sein, welcher zwischen den Endpunkten des Spannungskreises herrscht.

Für den Spannungskreis hat nämlich das Ohmsche Gesetz unverändert dieselbe Giltigkeit wie in Gleichstromkreisen, da der Spannungskreis induktionsfrei ist. Nachdem aus der Gleichung

$$i = \frac{e}{r}$$

der gesuchte Widerstand

$$r = \frac{e}{i}$$

ist, wird bei $i = 0{,}1$ Ampère und z. B. $e = 100$ Volt

$$r = \frac{100}{0{,}1} = 1000\,\Omega = 10\,e$$

sein.

Meßmethoden.

Im folgenden sollen einige Meßmethoden beschrieben werden, hauptsächlich aber solche, die bei technischen Messungen in Anwendung kommen.

In erster Linie müßte man die Spannungsmessung in Wechselstromkreisen behandeln. Nachdem aber die elektrostatischen Meßinstrumente noch sehr wenig benutzt werden und nur zumeist bei hohen Spannungen, verzichten wir auf eine eingehendere Behandlung derselben, um so mehr, da man gewöhnlich die stromdurchflossenen Meßapparate benutzt und wir diese bei der Strommessung so wie so eingehender besprechen werden.

In weiterer Verfolgung unserer Aufgabe sehen wir nun einiges über die Messung der Stromstärke in Wechselstromkreisen.

Allgemeines.

Wir sahen bereits in dem Vorhergesagten, daß man die Wechselstromstärke mit elektrostatischen, elektromagnetischen, elektrodynamischen und Wärmewirkungen messen kann. Nachträglich sei noch hinzugefügt, daß die elektroinduktive Abstoßung auch zur Messung der Wechselgrößen benutzt werden kann; dieser Teil der Meßinstrumententechnik ist aber noch nicht ganz ausgebildet, weshalb wir uns mit solchen Apparaten nicht eingehender befassen.

In der Meßtechnik sind die stromdurchflossenen Meßinstrumente am weit verbreitetsten, weil sie nebst bequemer Handhabung ziemlich genaue Resultate ergeben. Sie enthalten Eisenbestandteile, oder sind eisenfreie, und dementsprechend unterscheidet man zwei Klassen dieser Instrumente.

Über das Messen mit eisenhaltigen Strommessern.

Bei Benutzung der eisenhaltigen Stromzeiger muß man sehr vorsichtig vorgehen, da leicht größere Fehler begangen werden können. Man

muß zunächst vor Augen halten, daß diese Instrumente auf elektromagnetischer Wirkung beruhen und dementsprechend nur bei einem Wechselstrome von gewisser Kurvenform richtig zeigen. Eine Veränderung der Kurvenform verursacht auch die Veränderung des Ausschlages.

Ein anderer Faktor, welcher zu beachten ist, ist die Periodenzahl des Wechselstromes. Elektromagnetische Instrumente zeigen den richtigen

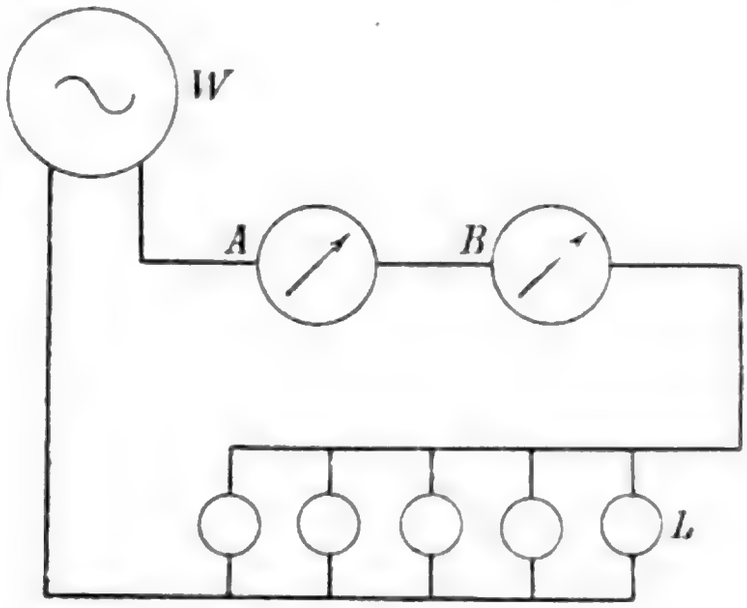


Fig. 74.

Wert nur dann, wenn bei gleichbleibender Kurvenform auch die Periodenzahl dieselbe bleibt. Will man daher ein solches Instrument in verschiedenen Wechselstromkreisen benutzen, dann muß man dasselbe für jeden Fall besonders aichen.

Die Aichung des Instrumentes muß durch ein solches Instrument vollführt werden, welches durch die Kurvenform und die Periodenzahl des Wechselstromes nicht beeinflußt wird. Dieses Normalinstrument wird mit dem zu aichenden Strommesser in Serie geschaltet und die Stromstärke durch Veränderung des Gesamtwiderstandes des Stromkreises stufenweise verändert.

Die Schaltungsweise ist aus der Fig. 74 ersichtlich. *A* ist das Normalinstrument, *B* der zu untersuchende Strommesser. *L* sind parallelgeschaltete Lampen, durch deren Einschaltung die Stromstärke stufenweise verändert werden kann. Die Stromquelle ist *W*.

Es ist vorteilhaft, von den Meßwerten eine Aichungskurve zu konstruieren, welche dann durch ihre Kontinuität auch solche Stromstärken ergibt, welche direkt nicht bestimmt worden waren. Hierbei werden die Werte der durch das Normalinstrument angegebenen Stromstärke auf die Abscissenachse, die Stromwerte des anderen Instrumentes auf die Ordinatenachse aufgetragen.

Je größer die Periodenzahl wird, um so kleiner ist der Ausschlag des Strommessers bei derselben Stromstärke, weil die im Eisenkerne auftretenden Hysteresis- und Wirbelstromverluste die Magnetisierung mit anwachsender Periodenzahl immer mehr niederdrücken. Ein anderer Faktor, welcher auch dazu beiträgt, daß der Ausschlag kleiner wird, ist in der Wirkung jener Wirbelströme zu suchen, welche in den Metallteilen induziert werden. Diese haben eine Richtung, welche in jeder Periode jener des wirkenden Wechselstromes entgegengesetzt ist und demnach eine entgegengesetzte Magnetisierung hervorruft. Diese Demagnetisierung schwächt dann die Anziehungskraft des ursprünglichen magnetischen Feldes und dadurch wird auch der Ausschlag des Instrumentes kleiner.

Eisenfreie Strommesser.

Zu diesen Instrumenten gehören die Elektrodynamometer und die Hitzdrahtampèremeter. Bei ersteren benutzt man die elektrodynamische, bei den letzteren die Wärmewirkung des elektrischen Stromes zu Meßzwecken.

Digitized by Google

Das Elektrodynamometer hat eine feste und eine bewegliche Drahtspule, welche nacheinander geschaltet sind und demnach dieselbe Stromstärke führen. Die Messung mit diesem Instrument wird so durchgeführt, daß man der Torsionsfeder der beweglichen Spule eine solche Torsion erteilt, daß letztere in ihre Ruhelage zurückkehrt. Ist dieser Torsionswinkel α, die zu messende Stromstärke aber i, dann wird

$$i^2 = c_1 \alpha$$

da derselbe Strom beide Spulen durchfließt. c_1 ist eine Konstante.

Aus obiger Gleichung bekommt man, daß

$$i = c\sqrt{\alpha}$$

wo c die Konstante des Instrumentes bedeutet. Ihr Wert hängt davon ab, wie viel Windungen die Spulen besitzen und welche Dimensionen sie haben. Auch spielt die Torsionskraft der Torsionsfeder hier eine Rolle.

Die letzte Gleichung ist für jede Stromstärke unabhängig von der Stromrichtung giltig. Sie wird also bei Wechselströmen auch für die Momentwerte Giltigkeit haben. Nachdem aber die in der Praxis verwendeten Wechselströme immer eine große Wechselzahl haben und die Trägheit der beweglichen Spule viel zu groß ist, um den einzelnen Stromimpulsen folgen zu können, wird das Elektrodynamometer in Wechselstromkreisen eine konstante Ablenkung ergeben, welche mit der effektiven Stromstärke proportional ist, d. h.

$$i_{eff} = c\sqrt{\alpha}$$

Die Ablenkung ist von der Stromrichtung unabhängig, deshalb kann man diese Instrumente sowohl in Gleich- als auch in Wechselstromkreisen benutzen. Man kann diese Apparate mit Gleich-

strom aichen oder die Konstante derselben mit Gleichstrom bestimmen.

Der Wert der Konstante ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$c = \frac{i}{\sqrt{\alpha}}.$$

Man muß also nur bei verschiedenen Stromstärken die dazugehörenden Torsionswinkel messen, und aus diesen Meßwerten nach obiger Formel für jeden Fall die Konstante berechnen. Aus den

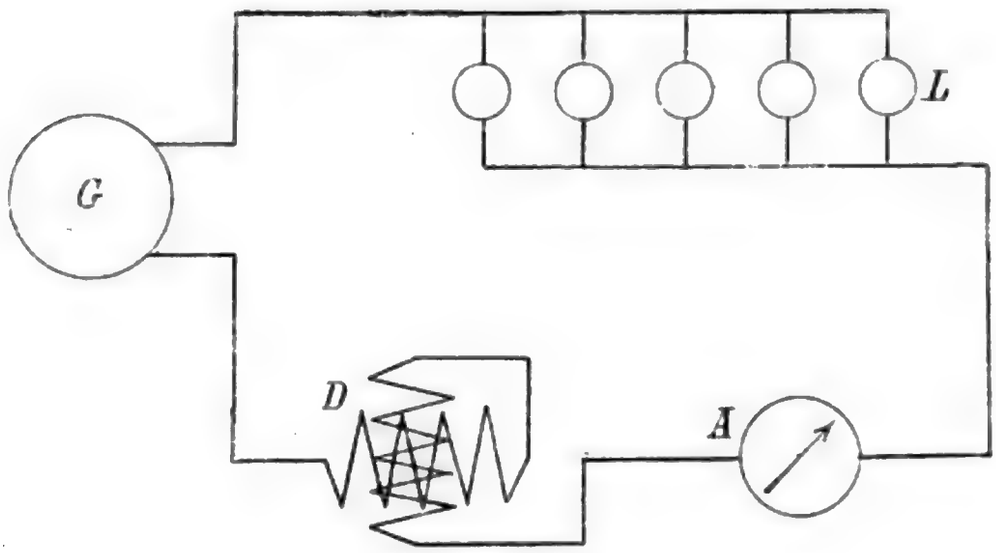


Fig. 75.

so erhaltenen Konstanten nimmt man dann den arithmetischen Mittelwert, dieser wird alsdann die gesuchte Konstante des Elektrodynamometers sein.

Die Schaltungsweise ist aus der Fig. 75 ersichtlich.

Aus der Gleichstromquelle G ausgehend, fließt der Strom durch die beiden miteinander in Serie geschalteten Wickelungen des Elektrodynamometers D, dann durch ein Normalinstrument A, um durch die Lampen L in die Stromquelle G zurück zu fließen. Durch die Veränderung der Anzahl der Lampen kann die Stromstärke beliebig variiert werden.

In derselben Weise kann man die Aichungskurve des Elektrodynamometers bestimmen. Hierbei trägt man die Stromstärken auf die eine Achse, die Torsionswinkel auf die andere Achse eines rechtwinkeligen Koordinatensystemes und verbindet die so erhaltenen Punkte mit einer kontinuierlichen Kurve.

Die Hitzdrahtinstrumente besitzen entweder eine Kreisverteilung oder eine Stromskala. In beiden Fällen kann man eine Aichung vornehmen, und zwar im ersten um die Aichungskurve zu bestimmen, im zweiten um die Fehlerkurve zu ermitteln.

Bestimmung der Konstante eines Wattmeters.

Das Wattmeter ist ebenfalls ein auf elektrodynamischer Wirkung beruhendes Instrument und ist seine Konstruktion mit dem Elektrodynamometer im wesentlichen übereinstimmend. Der Unterschied zwischen beiden ist der, daß während beim Elektrodynamometer beide Spulen nacheinander geschaltet sind und dementsprechend dieselbe Stromstärke führen, beim Wattmeter die fixe Spule den Hauptstrom, die bewegliche Spule dagegen einen viel schwächeren Strom führt, dessen Stärke aus der Potentialdifferenz zwischen den Endpunkten der Belastung und dem Gesamtwiderstande des Stromkreises der beweglichen Spule sich ergibt.

Ist daher die Stromstärke im Hauptstromkreise J, jene in der beweglichen Spule i, dann wird

$$J i = c \alpha$$

sein, wo c die Konstante des Wattmeters, α aber jener Torsionswinkel ist, welcher der Torsionsfeder erteilt werden mußte, um bei stromdurchflossenem Apparat die bewegliche Spule in ihre ursprüngliche Lage zurückbringen zu können.

Aus der Gleichung wird:

$$c = \frac{J\,i}{\alpha}$$

die zu bestimmende Konstante des Wattmeters.

Bei dieser Bestimmung muß man also sowohl die beiden Stromstärken J und i als auch den Torsionswinkel α messen. Man bestimmt die Konstante bei verschiedenem J und konstantem i und nimmt dann den arithmetischen Mittelwert.

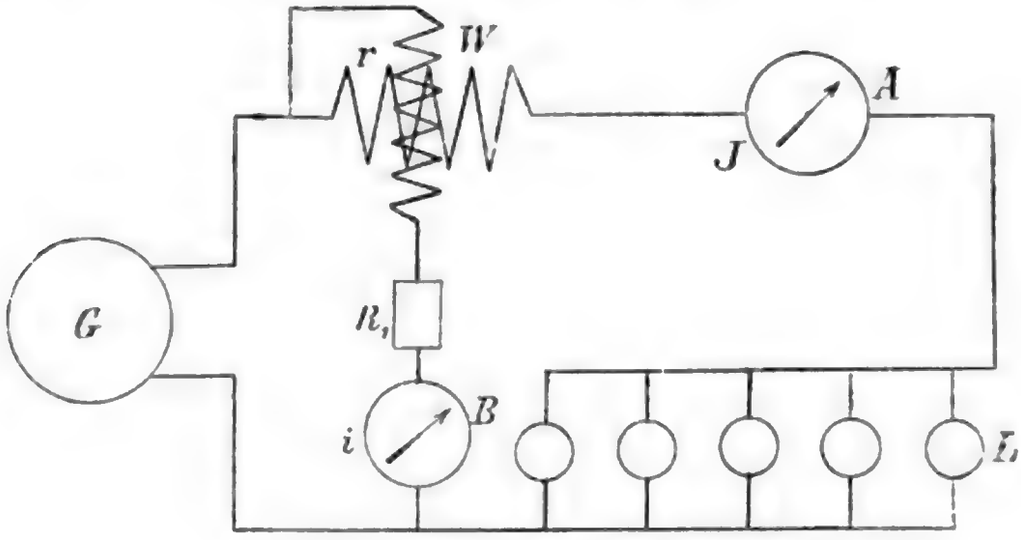


Fig. 76.

Die Schaltungsweise ist nach der Fig. 76 durchzuführen.

Zuerst wird der Hauptstromkreis gebildet. Die fixe Spule des Wattmeters W wird mit dem Normalinstrument A, welches die Stromstärke J mißt und mit den Lampen L in Serie geschaltet. Die bewegliche Spule nebst dem additionellen Widerstande R_1 und dem Normalampèremeter B, welches die Stromstärke i mißt, wird zum Hauptstromkreise parallel geschaltet. Die bewegliche Spule kann hier auch von einer separaten Stromquelle mit Strom versorgt werden, benutzt man aber dieselbe Stromquelle für beide Spulen, dann muß die Zuleitung der beweglichen Spule unbedingt vor der

Hauptstromspule abgezweigt werden, denn anderenfalls würde in der Hauptspule nicht der durch das Instrument A angezeigte Strom J fließen, sondern $(J+i)$ und dann wäre die abgeleitete Formel zur Berechnung der Konstante nicht mehr richtig. In diesem Falle müßte man

$$c = \frac{(J+i)\,i}{\alpha}$$

setzen, um richtige Werte zu bekommen.

Die Konstante läßt sich aber auch nach einer anderen Methode bestimmen. Wenn man nämlich den Widerstand der Zuleitungen der Spannungsspule vernachlässigt und den Widerstand der beweglichen Spule mit r bezeichnet, dann ist der Gesamtwiderstand des zum Hauptstromkreise parallel geschalteten Stromkreises $R = R_1 + r$. Multipliziert man nun die Gleichung auf Seite 229 mit R, dann wird

$$J\,i\,R = c\,\alpha\,R$$

sein.

Im Spannungskreise sind Ohmsche Verhältnisse, es ist weder Kapazität noch Selbstinduktion vorhanden, folglich ist der Spannungsverlust längs des ganzen Stromkreises gleich mit der Spannung e zwischen den Abzweigspunkten, und es ist demnach $i\,R = e$, und

$$J\,e = W = c\,\alpha\,R.$$

Dies besagt soviel, daß man die Wattleistung eines Wechselstromes bekommt, wenn man den erteilten Torsionswinkel mit der Konstante des Wattmeters und dem Gesamtwiderstande des Spannungskreises multipliziert.

Der Ausdruck des Wertes der Konstante des Wattmeters wird nun folgende Form annehmen:

$$c = \frac{J\,e}{\alpha\,R}$$

Digitized by Google

Bei dieser Bestimmungsmethode verwendet man also einen Strom- und einen Spannungsmesser.

Bei der Aichung des Wattmeters mißt man den Hauptstrom J und die Potentialdifferenz e zwischen den Endpunkten des Spannungskreises, wobei man zugleich die dazugehörigen Torsionswinkel abliest. Die Schaltungsweise mit selbständigen Stromquellen ist aus der Fig. 77 ersichtlich.

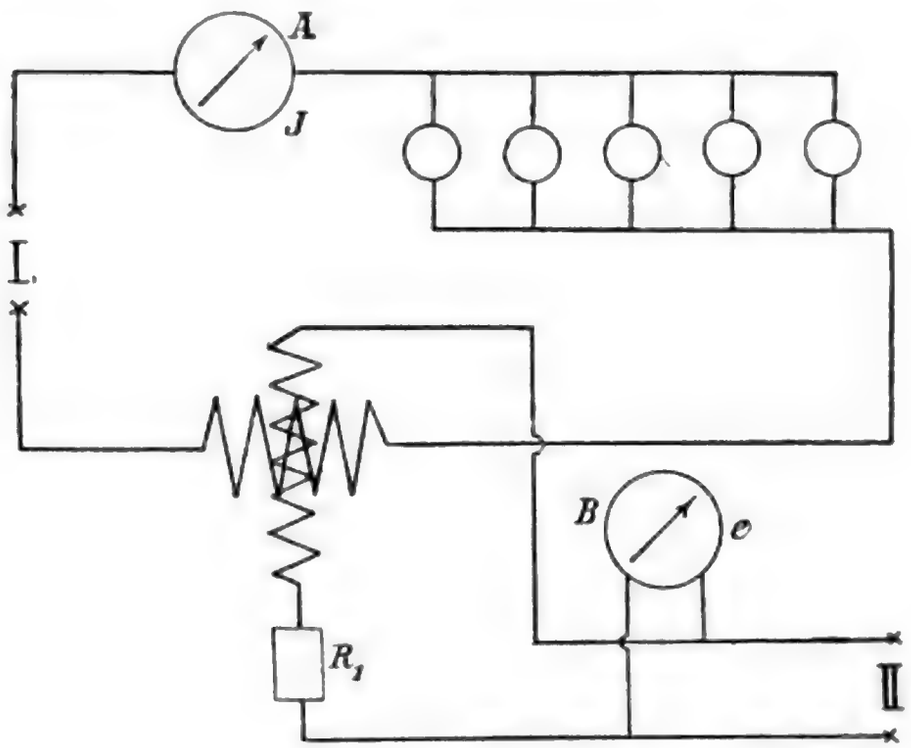


Fig. 77.

Die Schaltung des Hauptstromkreises ist unverändert dieselbe, wie in Fig. 76. Der Strom wird diesem aus der Stromquelle I zugeführt.

Der Spannungsstromkreis wird aus der Stromquelle II mit Strom versorgt, besitzt keinen Strommesser, sondern den Spannungsmesser B, der die Potentialdifferenz zwischen den Endpunkten des Spannungsstromkreises anzeigt.

Bei Wattmetermessungen muß man auf die Schaltungsweisen achten, und Korrektionen vornehmen, welche aus dem Eigenverbrauch des In-

Digitized by Google

strumentes und aus der Selbstinduktion der Spannungsspule sich ergeben. Während aber unter normalen Verhältnissen die erstere beträchtliche Werte annehmen kann, ist die letztere gewöhnlich so klein, daß man sie praktisch zumeist vernachlässigen kann, um so mehr, weil die Berechnung dieser Korrektion umständlich ist. Wir werden daher nur die erstere Korrektion in Betracht ziehen.

Bei Leistungsmessungen können zwei Schaltungsanordnungen angewandt werden, je nachdem

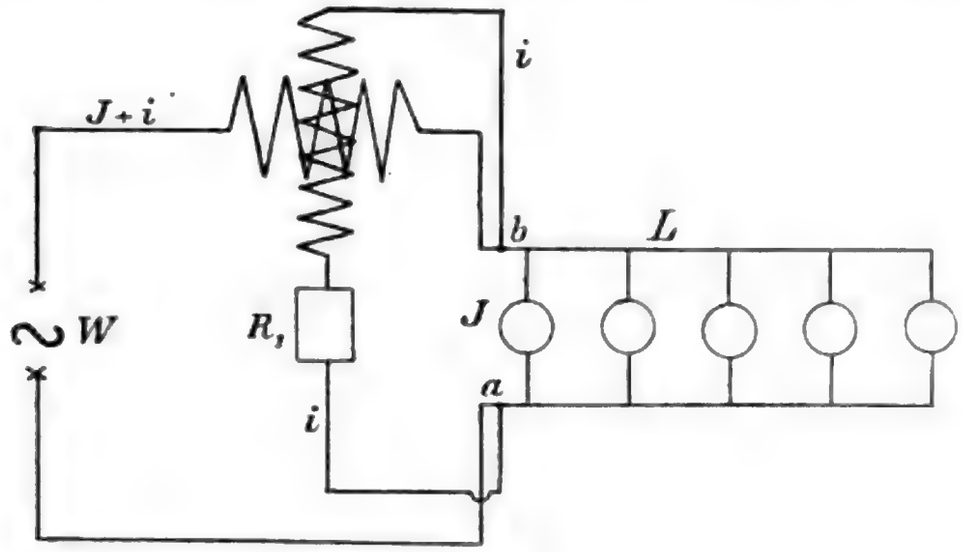


Fig. 78.

man den Stromkreis der beweglichen Spule nach der fixen Spule oder vor derselben abzweigt. Diese zwei Schaltungen sind in den Fig. 78 und 79 abgebildet.

In Fig. 78 sind die Endpunkte des Spannungsstromkreises *a* und *b*, d. h. dieser Stromkreis ist mit jener Belastung, in unserem Falle den Lampen *L*, parallel geschaltet, deren Energieverbrauch man eben messen will. Es ist einleuchtend, daß das Wattmeter nun eine größere Leistung anzeigt, als dem Energieverbrauche der Lampen entspricht, und zwar wird der Mehrverbrauch mit dem Eigenverbrauche des Spannungskreises gleich sein.

Dies zeigt übrigens auch folgende einfache Berechnung.

Sei die durch die Lampen fließende Stromstärke J, die Stromstärke im Spannungskreise i. Nachdem nur Ohmsche Widerstände vorhanden sind, werden J und i in Phase sein, und dementsprechend durch die fixe Spule ein resultierender Strom fließen, dessen Größe die Summe der Komponentströme, also $J+i$ sein wird.

Wenn nun der erteilte Torsionswinkel α, und c die Konstante des Wattmeters ist, dann wird die durch das Wattmeter angezeigte Leistung

$$W_1 = c\,\alpha\,R$$

sein, wobei R den Gesamtwiderstand des Spannungskreises bedeutet.

Anderseits sahen wir, daß

$$c\,\alpha\,R = (J+i)\,i\,R$$

ist, da in den einzelnen Spulenteilen des Wattmeters die Ströme $(J+i)$ und i fließen.

Die durch die Lampen verbrauchte Energie ist naturgemäß

$$W_2 = J\,e = J\,i\,R$$

wenn e die Potentialdifferenz zwischen den Punkten a und b ist.

Die vorletzte Gleichung entwickelt, ergibt sich das Resultat:

$$c\,\alpha\,R = J\,i\,R + i^2\,R$$

d. h.

$$W_1 = W_2 + i^2\,R$$

oder

$$W_2 = W_1 - i^2\,R.$$

$i^2\,R$ ist jene Wärmemenge, welche in dem Spannungsstromkreis entsteht, das ist also der Eigenverbrauch dieses Stromkreises. Die letzte Gleichung

Digitized by Google

besagt daher, daß die wirkliche Leistung bei dieser Schaltungsanordnung kleiner ist, als die durch das Wattmeter angezeigte, und zwar um den Verbrauch des Spannungsstromkreises. Man muß also jetzt vom gemessenen Werte die Leistung $i^2 R$ subtrahieren, um die wirkliche Leistung zu bekommen.

In vielen Fällen ist es umständlich, diese Korrektion zu berechnen, da man gewöhnlich i nicht kennt. In allen Fällen ist aber die Spannungsdifferenz zwischen a und b bekannt, und man kann die Korrektion dementsprechend so berechnen, daß man den Strom i überhaupt nicht in Betracht zieht.

Nachdem im Spannungskreise Ohmsche Widerstände sind, besteht dort Ohms Gesetz ohne jede Modifikation, d. h. es wird

$$i = \frac{e}{R}$$

sein.

Diesen Wert der Stromstärke in das Korrektionsglied eingesetzt, erhält man:

$$i^2 R = \frac{e^2}{R^2} R = \frac{e^2}{R}$$

und die wirkliche Leistung:

$$W_2 = c\,\alpha\,R - \frac{e^2}{R}.$$

Bei den Messungen muß man diese Korrektion immer berechnen, da mitunter beträchtliche Fehler begangen werden können. Es sei z. B. die Leistung zu bestimmen, welche nötig ist, um zwischen den Punkten a und b bei einer konstanten Spannung $e = 100$ Volt, $W_2 = 1000$ Watt zu produzieren. Wenn das Wattmeter so konstruiert ist, daß durch die Spannungsspule ein Maximalstrom von nur

Digitized by Google

0,1 Ampère fließen darf, dann muß bei 100 Volt Spannung $R = 1000$ Ohm sein, und es wird dann die Größe des Korrektionsgliedes

$$\frac{e^2}{R} = \frac{10000}{1000} = 10 \text{ Watt}$$

sein, welches 1% der Gesamtleistung ist. Das Wattmeter wird in diesem Falle

$$W_1 = 1000 + 10 = 1010 \text{ Watt}$$

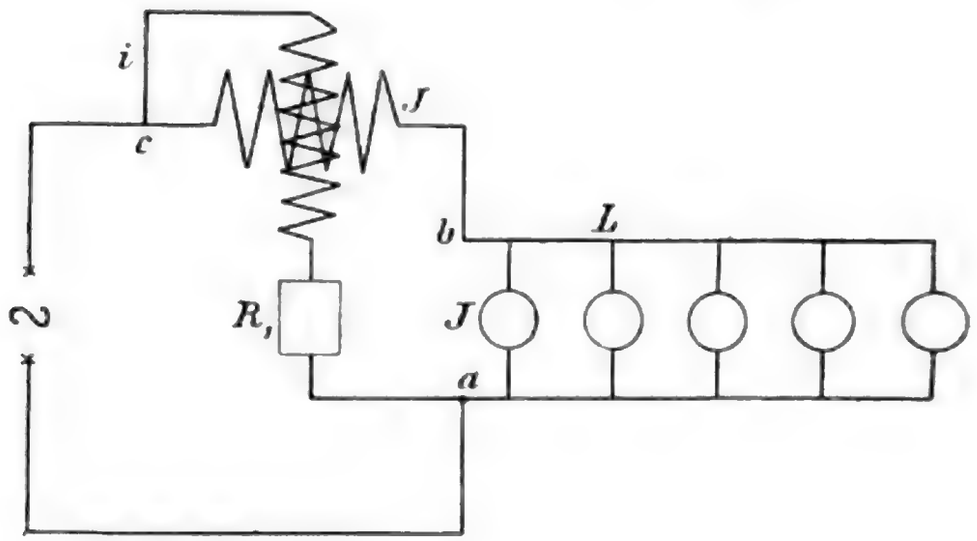


Fig. 79.

anzeigen, was den tatsächlichen Verhältnissen nicht entspricht.

Eine zweite Schaltungsweise ist in Fig. 79 abgebildet. Bei dieser sind die Abzweigpunkte des Spannungskreises a und c, die Spannungsspule wird also vor die Hauptstromspule geschaltet. Benötigt die Belastung L die Stromstärke J, dann wird auch die fixe Spule diese Stromstärke führen. Ist nun zwischen den Punkten a und b die Spannungsdifferenz e, dann wird die wirkliche Nutzleistung der Stromquelle

$$W_2 = J e$$

sein.

Sehen wir nun, welche Leistung wird durch das Wattmeter bei dieser Schaltung angezeigt. Die beiden Stromstärken sind J und i, der Gesamtwiderstand des Spannungskreises R, folglich ist

$$W_1 = c\,\alpha\,R = J\,i\,R = J\,e_1$$

wo e_1 die Spannungsdifferenz zwischen a und c bedeutet.

Diese Spannungsdifferenz ist größer als e, denn ein Teil der Spannung geht längs der Hauptstromspule verloren. Ist der Widerstand dieser r, dann ist der Spannungsverlust $J\,r$ und

$$e_1 = e + J\,r.$$

Dementsprechend wird

$$W_1 = J\,(e + J\,r) = J\,e + J^2\,r$$

oder

$$W_1 = W_2 + J^2\,r$$

sein.

Das zweite Glied dieser Gleichung ist ebenfalls Wärme, und zwar jene Wärmemenge, welche in der festen Spule des Wattmeters entsteht. Das Wattmeter zeigt also auch in diesem Falle mehr an, als der wirklichen Leistung entspricht, und zwar um den Eigenverbrauch der festen Spule mehr. Bei dieser Schaltung ist dementsprechend von der durch das Wattmeter angezeigten Leistung der Wert $J^2\,r$ abzuziehen.

Was den Spannungsstromkreis betrifft, ist noch zu bemerken, daß der Widerstandskasten R_1 stets so einzuschalten ist, daß zwischen der festen und der beweglichen Spule, welche ziemlich nahe zueinander liegen, keine großen Potentialdifferenzen entstehen können. Die Schaltung muß dementsprechend so durchgeführt werden, daß man den Widerstand R_1 in jenen Teil des Spannungsstromkreises verlegt, welcher mit jener Haupt-

Digitized by Google

leitung verbunden ist, die die Hauptstromspule nicht enthält. In allen unseren Abbildungen ist diese Schaltung angewendet worden.

Bestimmung des Formfaktors eines Wechselstromes.

Unter Formfaktor versteht man das Verhältnis der effektiven Stromstärke zur mittleren und zwar ist:

$$f = \frac{i_{eff}}{i_m}.$$

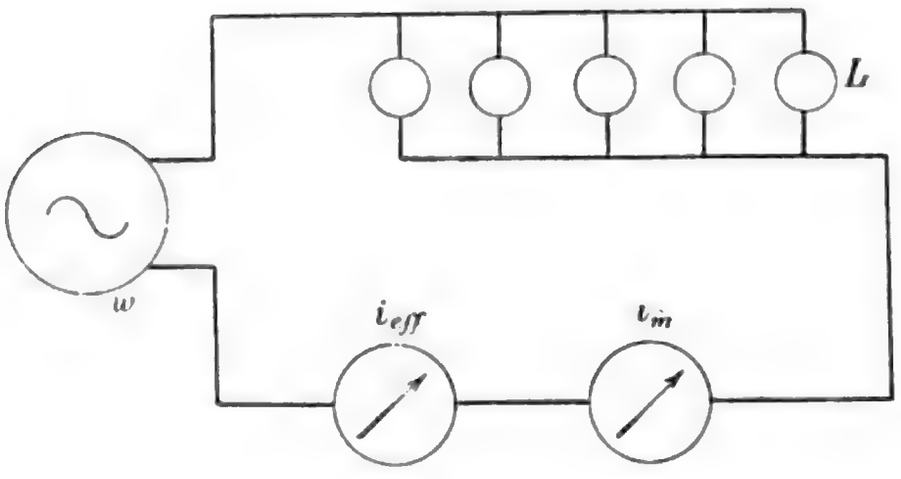


Fig. 80.

Bei experimenteller Bestimmung dieses Wertes benutzt man also Instrumente, welche obige Stromstärken ergeben, also ein Elektrodynamometer und ein auf der elektromagnetischen Wirkung des Stromes beruhendes Ampèremeter. Diese Meßapparate werden nach Fig. 80 nacheinander geschaltet, außerdem ist noch ein veränderlicher Widerstand vorgesehen, um die Stromstärke verändern zu können.

Man mißt nun bei verschiedenen Widerständen i_m und i_{eff}, berechnet den Formfaktor und nimmt dessen Mittelwert. Am besten eignen sich für Ballastwiderstände parallelgeschaltete Glühlampen,

Digitized by Google

da diese nur Ohmschen Widerstand repräsentieren, und dadurch die symmetrische Wellenform des Stromes nicht beeinflussen.

Bestimmung der Phasenverschiebung in einem Wechselstromkreise.

Es sei in einem Wechselstromkreise eine Induktionsspule eingeschaltet. Hierdurch wird die Stromstärke in ihrer Phase hinter der Spannung zurückbleiben und es soll nun diese Phasenverschiebung ermittelt werden.

Nachdem eine, mit einem Eisenkerne versehene Drahtspule nicht nur eine Phasenverschiebung verursacht, sondern auch die Wellenform des Wechselstromes verzerrt, darf hier die Phasenverschiebung nur insofern als konstant betrachtet werden, wenn wir die Spannungs- und Stromkurven durch die äquivalenten Sinuslinien (s. d.) ersetzt denken und den Cosinus des Phasenverschiebungswinkels als Leistungsfaktor definieren.

Bei der Messung verfährt man in der Weise, daß man den Energieverbrauch der Induktionsspule, die Stromstärke und jene Spannungsdifferenz mißt, welche zwischen den Endpunkten der Spule auftritt.

Ist der Leistungsfaktor $\cos\varphi$, die Stromstärke i und die genannte Potentialdifferenz e, dann wird der Energieverbrauch der Induktionsspule

$$W = e\,i\cos\varphi$$

sein.

Dividiert man W mit $e\,i$, dann erhält man den Leistungsfaktor

$$\cos\varphi = \frac{W}{i\,e}.$$

Die Schaltungsanordnung ist aus der Fig. 81 zu entnehmen. Die Induktionsspule S ist mit der

Digitized by Google

Hauptstromquelle des Wattmeters W und dem Elektrodynamometer D in Serie geschaltet. Zu den Endpunkten der Spule S wird ein Voltmeter, sowie der Spannungsstromkreis des Wattmeters geschaltet. Die Lampen L dienen nur zur Regulierung der Stromstärke im Stromkreise. Das Dynamometer gibt die durch die Induktionsspule fließende Stromstärke i, das Voltmeter die Spannungsdifferenz e an. Das Wattmeter zeigt eine Leistung; diese ist

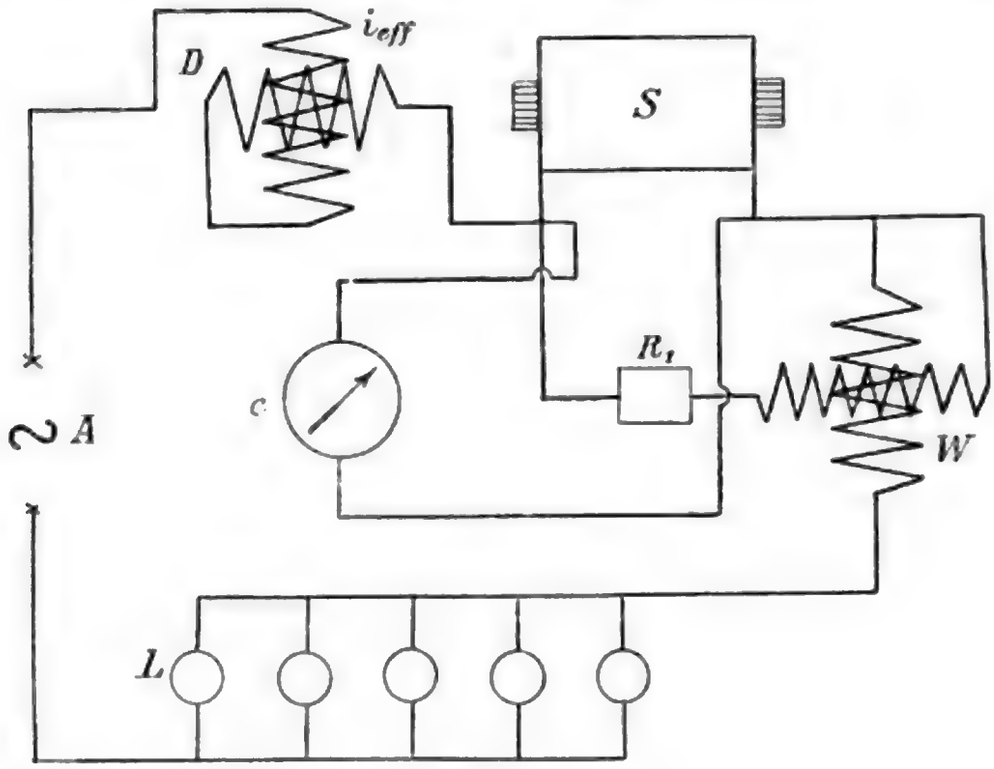


Fig. 81.

aber nicht die wirkliche, man muß vielmehr Korrektion anwenden. Die Korrektion ist bei dieser Schaltung $\frac{e^2}{R}$ und die tatsächliche Leistung:

$$W = c\,\alpha\,R - \frac{e^2}{R} - \frac{e^2}{R_v}$$

denn man muß außer der Wattmeterkorrektion auch jene Energiegröße subtrahieren, welche durch das Voltmeter verbraucht wird. Wenn der Widerstand des Voltmeters R_v ist, dann wird bei

der Spannung e sein Eigenverbrauch $\frac{e^2}{R_v}$ sein. Der Leistungsfaktor kann demnach folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\cos\varphi = \frac{c\,\alpha\,R - \frac{e^2}{R} - \frac{e^2}{R_v}}{i\,e}.$$

Hierbei ist allerdings nicht in Betracht gezogen, daß das Dynamometer auch Eigenverbrauch hat, doch ist dies zumeist so klein, daß es vernachlässigt werden kann.

Der Leistungsfaktor ist nicht konstant, sondern hängt von der Stromstärke ab. Man darf darum von bei verschiedenen Stromstärken bestimmten Leistungsfaktoren keinen Mittelwert nehmen.

Bestimmung des Selbstinduktionskoeffizienten eines Leiters.

Ist in einem Stromkreise Ohmscher Widerstand und Selbstinduktion eingeschaltet, dann ist bei gegebener Spannung der Wert der Stromstärke durch die Gleichung

$$J = \frac{E_t}{\sqrt{R^2 + L^2\,\omega^2}}$$

gegeben.

Aus dieser Formel läßt sich der Selbstinduktionskoeffizient folgendermaßen ausdrücken:

$$L = \frac{\sqrt{E_t^2 - J^2 R^2}}{J\,\omega}$$

oder nachdem bei der Periodenzahl $\sim$

$$\omega = 2\,\pi\,\sim$$

wird

$$L = \frac{\sqrt{E_t^2 - J^2 R^2}}{J\,2\,\pi\,\sim}.$$

Digitized by Google

In dieser Formel bedeutet R den Ohmschen Widerstand des Leiters.

Um nun L experimentell bestimmen zu können, muß man die Spannung und die Stromstärke messen. Den Ohmschen Widerstand mißt man nachträglich in bekannter Weise.

Die Schaltung ist nach Fig. 82 durchzuführen.

In den zur Stromquelle W gehörenden Stromkreis werden der Induktionswiderstand, das Dynamo-

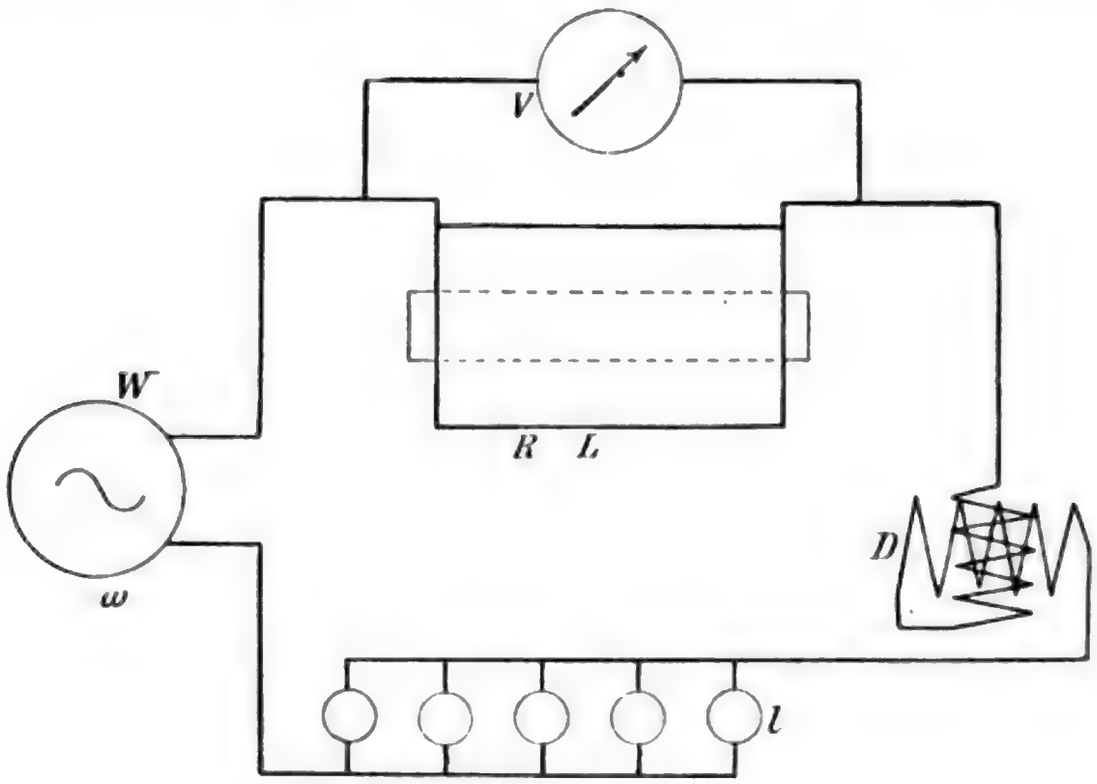


Fig. 82.

meter D und Lampenwiderstände l nacheinander geschaltet. Mit dem Voltmeter V mißt man die Spannungsdifferenz zwischen den Endpunkten der Induktionsspule, dessen Widerstand R und Selbstinduktionskoeffizient L ist.

Aus diesen gemessenen Werten wird L in der oben angegebenen Weise berechnet. Hierbei muß man die Periodenzahl des Wechselstromes kennen Nachdem die Größe der Selbstinduktion von der magnetischen Feldstärke, diese aber von der Per-

meabilität des paramagnetischen Materiales abhängt, und letztere nicht konstant ist, kann auch L nicht konstant sein. Ihr Wert verändert sich, je nachdem die Stromstärke größer oder kleiner wird.

Anderseits läßt sich der Selbstinduktionskoeffizient auch folgendermaßen bestimmen.

Wie bekannt, ist bei Ohmschem und induktivem Widerstande der Wechselstromwiderstand

$$X = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}.$$

Hieraus wird

$$L = \frac{\sqrt{X^2 - R^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{X^2 - R^2}}{2 \pi \sim}.$$

In diesem Ausdrucke muß man X kennen. Zu diesem Zwecke mißt man die durch den Induktionswiderstand fließende Stromstärke sowie die Potentialdifferenz an den Endpunkten der Spule. Sind diese Größen J beziehungsweise E, dann wird

$$X = \frac{E}{J}.$$

Die Periodenzahl wird dadurch bestimmt, daß man die Umdrehungszahl der Wechselstrommaschine während einer Minute zählt. Kennt man die Polzahl k, dann wird bei n Umdrehungen pro Minute die gesuchte Periodenzahl

$$\sim = \frac{n k}{2 . 60} = \frac{n k}{120}.$$

Experimentelle Bestimmung des Arbeits- und des Erregerstromes.

Fließt ein Wechselstrom durch einen induktiven Widerstand, dann erleidet er eine Phasenverschiebung. Ein Teil dieses Stromes kann nun

so aufgefaßt werden, daß er zur Deckung der gesamten Arbeitsverluste dient, ein anderer Teil dagegen nur dazu verwendet wird, um im Äther Spannungszustände hervorzubringen. Dementsprechend spricht man von Arbeits- und Erregerstrom, der Gesamtstrom hängt aber von den Werten dieser beiden ab, jedoch darf keine arithmetische Summation vorgenommen werden, da die Phasen der Teilströme verschieden sind. Der Zusammenhang zwischen diesen drei Größen läßt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$i_t = \sqrt{i_n^2 + i_o^2}$$

wenn i_t den Gesamtstrom, i_n und i_o aber den Arbeits-, beziehungsweise Erregerstrom bedeuten.

Aus diesen Werten kann nur i_t gemessen werden, i_n und i_o berechnet man. Man mißt zu diesem Zwecke die verbrauchte Leistung W und ermittelt hieraus i_n.

Wir wissen, daß der Arbeitsstrom und die Spannung in der Phase zusammenfallen, daß also

$$e\, i_n = W$$

die effektive Wattleistung, d. h. jene Leistung ist, welche durch das Wattmeter gemessen wird. Kennt man daher die Spannung, dann läßt sich i_n leicht berechnen, nämlich

$$i_n = \frac{W}{e}.$$

Hiermit ist aber auch die Erregerkomponente bestimmt, denn laut der ersten Gleichung wird:

$$i_o = \sqrt{i_t^2 - i_n^2}$$

sein.

Der durch einen Induktionswiderstand fließende Strom wird durch das Elektrodynamometer D

Digitized by Google

gemessen (Fig. 83). Derselbe Strom durchfließt die feste Spule des Wattmeters, sowie die als Ballastwiderstände dienenden Lampen *L*. Zu den Endpunkten des Induktionswiderstandes ist ein Voltmeter *V* und die Spannungsspule des Wattmeters geschaltet.

Das Wattmeter zeigt eine größere Leistung an, als die tatsächliche, man muß deshalb Korrektionen vornehmen. Zwei Korrektionsglieder müssen in Betracht gezogen werden, und zwar der Eigen-

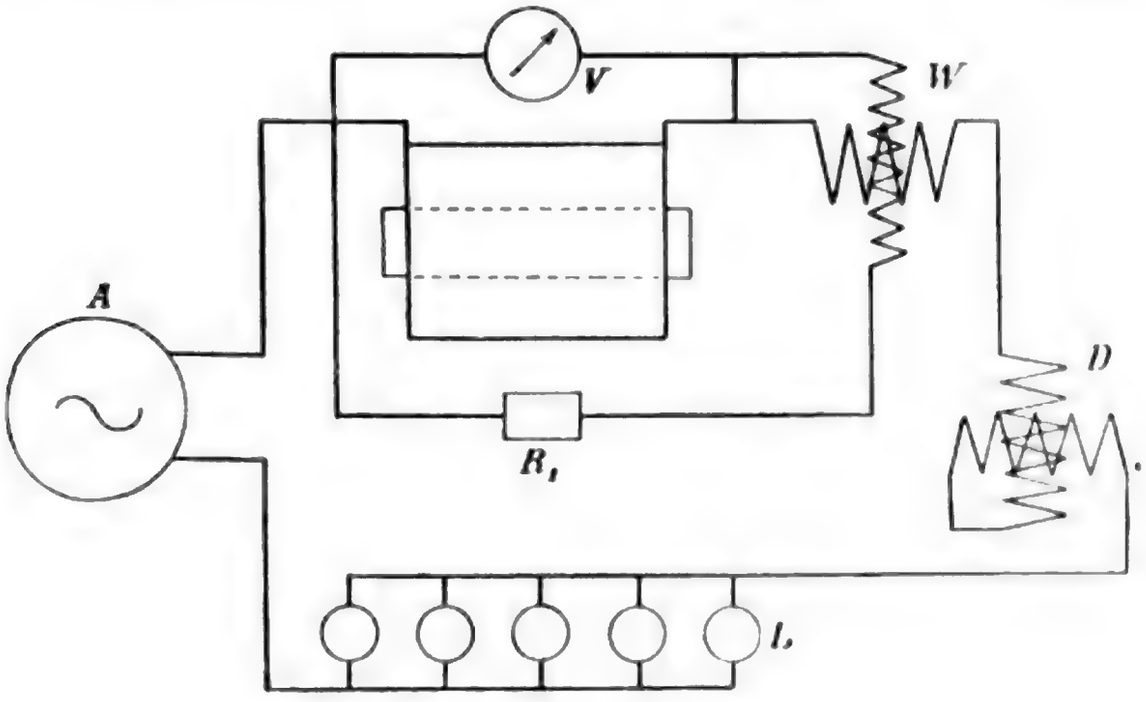


Fig. 83.

verbrauch des Voltmeters und jener des Spannungsstromkreises des Wattmeters.

Besitzt das Voltmeter den Widerstand R_v, dann ist sein Eigenverbrauch bei der angezeigten Spannung e gleich mit $\frac{e^2}{R_v}$.

In analoger Weise verbraucht der Spannungsstromkreis die Energie $\frac{e^2}{R}$, wenn R den Gesamtwiderstand dieses Stromkreises bedeutet. Die wirk-

liche Leistung wird daher

$$W = c\,\alpha\,R - \left(\frac{e^2}{R_v} + \frac{e^2}{R}\right)$$

sein, wenn c die Konstante des Wattmeters, α aber der erteilte Torsionswinkel ist.

Dementsprechend ist der Ausdruck des Arbeits- oder Wattstromes

$$i_n = \frac{c\,\alpha\,R - \left(\frac{e^2}{R_v} + \frac{e^2}{R}\right)}{e}.$$

Bestimmung der Kapazität eines Kondensators.

Nach der Gleichung auf Seite 145 ist die Kapazität eines Kondensators:

$$c = \frac{i_{eff}}{e_{eff}\,\omega}$$

wo i_{eff} jene effektive Stromstärke bedeutet, welche in einem Stromkreise auftritt, der nur den Kondensator enthält und e_{eff} die effektive Spannung zwischen den Klemmen des Kondensators ist. ω wird aus der Periodenzahl berechnet, da

$$\omega = 2\,\pi\,\nu.$$

Man benötigt demnach zur Kapazitätsbestimmung einen Strom- und einen Spannungsmesser. Der Strommesser wird mit dem Kondensator in Serie geschaltet (Fig. 84), der Spannungsmesser dagegen an die Klemmen des Kondensators angelegt.

Der Strom setzt sich hierbei aus zwei Komponenten zusammen. Eine Komponente ist der Ladestrom, dessen Vektor der Kondensatorspannung um eine Viertelperiode voreilt, die zweite Kom-

Digitized by Google

ponente fällt mit der Spannung in der Phase zusammen und dient zur Deckung der auftretenden Arbeitsverluste. Diese Verluste ergeben sich einerseits aus der dielektrischen Hysteresis, anderseits aber aus der mangelhaften Isolation des Kondensators. Allerdings sind bei sorgfältigen Ausführungen diese Verluste klein, so daß der Arbeitsstrom im Verhältnis zum Ladestrome auch verschwindend ist und dementsprechend der gemessene Strom mit dem Ladestrom gleich gesetzt werden kann.

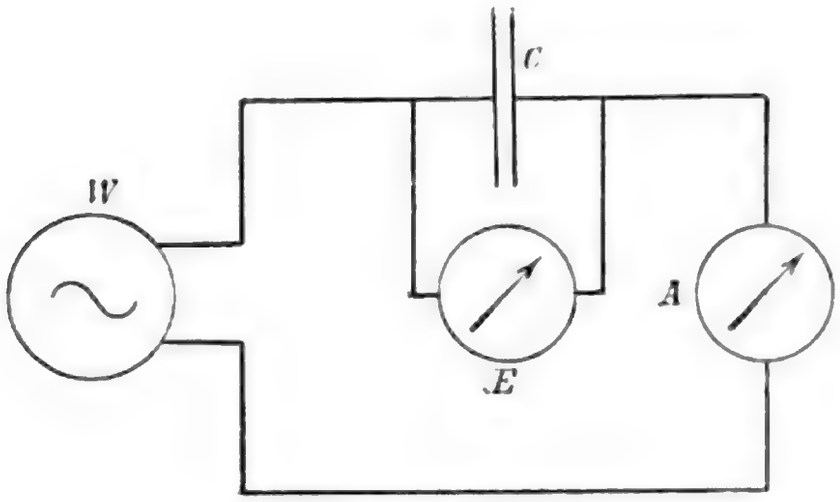


Fig. 84.

Die Größe des Arbeitsstromes kann hier in derselben Weise bestimmt werden, als bei einer Induktionsspule. Man mißt zu diesem Zwecke mit einem Wattmeter die durch den Kondensator verbrauchte Energie und dividiert dann mit der gemessenen Kondensatorspannung. Die Korrektionen dürfen nicht außer acht gelassen werden, denn man würde eine viel zu große Wattkomponente berechnen. Am einfachsten ist, den Spannungskreis des Wattmeters parallel zum Kondensator schalten, dann wird die im Kondensator verbrauchte Energie

$$W = c\,\alpha\,R - \frac{e^2}{R} - \frac{e^2}{R_v}$$

sein, wenn R den Gesamtwiderstand des Spannungskreises und R_v den Widerstand des Spannungsmessers bedeutet.

Die weitere Berechnung des Wattstromes erfolgt in derselben Weise, wie bei dem Induktionswiderstande der letztbesprochenen Bestimmungsmethode.

Was die Einheiten der gemessenen Größen betrifft, ist zu bemerken, daß, wenn die Stromstärke in Ampère, die Spannung in Volt gemessen wird, die Kapazität dann in Farad sich ergibt. Mit 10^6 multipliziert, bekommt man diesen Wert in Mikrofarad ausgedrückt.

Eine zweite Bestimmungsmethode besteht darin, daß man in dem Stromkreis den Kondensator mit einem Ohmschen Widerstand in Serie schaltet. Diese Schaltungsweise ist in Fig. 50 abgebildet.

Mißt man in diesem Falle die Gesamtspannung e_t, sowie die Stromstärke i_t, dann wird bei einem Ohmschen Widerstande R

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{c^2 \omega^2}}}$$

und hieraus die gesuchte Kapazität

$$c = \frac{i_t}{\omega \sqrt{e_t^2 - i_t^2 R^2}}.$$

Die Berechnung ist einfacher, wenn man den Wechselstromwiderstand in Betracht zieht.

Besitzt ein Stromkreis Ohmschen Widerstand und Kapazität, dann ist der genannte Wechselstromwiderstand

$$X = \sqrt{R^2 + \frac{1}{c^2 \omega^2}}.$$

Digitized by Google

Der Wert von X ergibt sich, wenn man die Stromstärke und die Spannung mißt und diese Werte miteinander dividiert. Es wird dann

$$X = \frac{e_{eff}}{i_{eff}}$$

sein, und aus obigem Ausdrucke:

$$c = \frac{1}{\sqrt{X^2 - R^2}}.$$

Bestimmungsmethoden der Periodenzahl eines Wechselstromes.

Die Periodenzahl kann am einfachsten dadurch bestimmt werden, daß man die Umdrehungszahl des Generators in der Minute zählt und dann mit Hilfe der Polzahl des Magnetrades die gesuchte Periodenzahl berechnet.

Macht eine zweipolige Maschine n Umdrehungen in der Minute, dann ist die Periodenzahl des induzierten Wechselstromes

$$\sim = \frac{n}{60}$$

da jeder Umdrehung eine volle Periode entspricht und die Periodenzahl auf die Sekunde bezogen wird.

Hat der Generator im allgemeinen k Pole, dann ist die Anzahl der Polpaare $\frac{k}{2}$ und nach obigen Erörterungen die Periodenzahl

$$\sim = \frac{n\,k}{60 \cdot 2}.$$

Diese Bestimmungsweise ist sehr einfach und erheischt nur einen Tourenzähler und eine Uhr

mit Sekundenzeiger. Sie ist aber nur dann anwendbar, wenn der Strom durch eine eigene Maschine hergestellt wird und keine Zentralstation den Wechselstrom liefert.

Ist letzteres der Fall und hat man einen Synchronmotor zur Verfügung, dann kann man folgendermaßen verfahren.

Man setzt den Synchronmotor in geeigneter Weise in Gang und mißt dessen Umdrehungszahl. Aus der Polzahl und der sekundlichen Tourenzahl wird dann die Periodenzahl des antreibenden Wechselstromes in derselben Weise berechnet, wie zuvor.

Der Synchronmotor kann zu solchen Bestimmungen sehr gut benutzt werden, da er nur dann in Gang bleibt, wenn er seine, von der Periodenzahl des Wechselstromes abhängende, konstante Tourenzahl hat. Wie wir in einer anderen Abteilung dieses Werkes sehen werden, geht ein Synchronmotor entweder mit seiner oben umschriebenen konstanten Tourenzahl oder er steht still. Die Arbeitsleistung ist zur konstanten Tourenzahl gebunden. Wechselt die Belastung eines solchen Motors, dann ändert sich zwar die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, doch die Umdrehungszahl verändert sich nicht. Wird die Belastung zu groß, dann fällt der Motor aus seinem synchronen Gange und bleibt stehen.

Hat der Motor dieselbe Polzahl als der Generator, dann läuft er mit derselben Tourenzahl im Synchronismus. Ist seine Polzahl die Hälfte derjenigen des Generators, dann muß seine Umdrehungszahl die doppelte sein, um in Synchronismus zu bleiben, denn nur in diesem Falle sind die Polwechselzahlen bei beiden Maschinen dieselben.

Man sieht hieraus, daß der Synchronmotor zur Periodenzahlbestimmung gut verwendbar ist. Ein Nachteil ist jener Umstand, daß er erst mit äußerer

Arbeit auf seine konstante Tourenzahl gebracht werden muß, bevor er in die Wechselstromleitung eingeschaltet werden kann. Jene Methoden, welche diesen Zeitpunkt erkennen lassen, werden in einem anderen Teil dieses Werkes eingehender besprochen.

Die Periodenzahl kann indessen auch mit anderen Methoden bestimmt werden. Hat man eine Induktionsspule mit bekanntem Selbstinduktionskoeffizienten und schaltet diese in den betreffenden Wechselstromkreis, dann kann man die Periodenzahl mit Strom- und Spannungsmessung ermitteln.

Die Schaltungsweise ist mit der auf Fig. 82 gezeichneten übereinstimmend. Ist die gemessene Spannungsdifferenz zwischen den Endpunkten der Induktionsspule e, die diese Spule durchfließende Stromstärke aber i, dann ist

$$i = \frac{e}{\sqrt{R^2 + l^2 \omega^2}}$$

wobei l den bekannten Selbstinduktionskoeffizienten und R den Ohmschen Widerstand der Induktionsspule bedeuten.

Aus dieser Gleichung läßt sich die Periodenzahl ausdrücken, wenn man in Betracht zieht, daß $\omega = 2\pi\infty$. Die Umformung der Gleichung vollführt, wird

$$\infty = \frac{\sqrt{e^2 - i^2 R^2}}{2\pi i l}$$

sein.

Zu demselben Zweck kann auch ein Kondensator verwendet werden.

In einen Stromkreis wird ein Kondensator von bekannter Kapazität eingeschaltet. Ist der gesamte Ohmsche Widerstand R, die Kapazität c, dann wird bei einer gemessenen Spannung e die Stromstärke durch die Gleichung

$$i = \frac{e}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 c^2}}}$$

ausgedrückt und hieraus

$$\infty = \frac{i}{2\pi c \sqrt{e^2 - i^2 R^2}}.$$

Man kann auch den Wechselstromwiderstand zur Bestimmung der Periodenzahl benutzen, und zwar ist

$$X = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 c^2}}.$$

Aus dieser Gleichung bekommt man die Periodenzahl ∞ als

$$\infty = \frac{1}{2\pi c \sqrt{X^2 - R^2}}.$$

Außer diesen angeführten Methoden sind noch viele andere mehr oder weniger komplizierte Verfahren bekannt für die Bestimmung der Periodenzahl, es würde aber zu weit führen, diese Methoden zu beschreiben. Wir verweisen dies betreffend auf die ausgedehnte Fachliteratur.

Digitized by Google

VIII. Kapitel.

Formelsammlung.

Induzierte elektromotorische Kraft in einem linearen Leiter (Seite 21)

$$e = l\,B\,v\,\cos\alpha. \qquad 1)$$

In einem Drahtringe induzierte elektromotorische Kraft bei homogenem magnetischen Felde:

$$e = -N\,\omega\,\sin\alpha. \qquad 2)$$

Periodenzahl eines Wechselstromes (Seite 43)

$$\nu = \frac{n\,k}{120}. \qquad 3)$$

Wechselzahl

$$z = 2\,\nu = \frac{n\,k}{60}. \qquad 4)$$

Mittlere elektromotorische Kraft bei Sinusveränderung des Wechselstromes (Seite 51):

$$e_m = \frac{2}{\pi}\,E_{max}. \qquad 5)$$

Effektiver Wert der elektromotorischen Kraft bei obiger Bedingung (Seite 53):

$$e_{eff} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\,E_{max}. \qquad 6)$$

Digitized by Google

Mittlere und effektive Stromstärke:

$$i_m = \frac{2}{\pi} J_{max}. \qquad 7)$$

$$i_{eff} = \frac{J_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, J_{max}. \qquad 8)$$

Formfaktor bei Sinusströmen (Seite 54):

$$f = \frac{\sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} E^2{}_{max} \sin^2 \alpha \, d\alpha}}{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} E_{max} \sin \alpha \, d\alpha} = \frac{e_{eff}}{e_m}. \qquad 9)$$

Momentwert der elektromotorischen Kraft bei Sinusveränderung:

$$e = E_{max} \sin \omega t. \qquad 10)$$

Effekt eines Wechselstromes (Seite 78):

$$W = e_{eff}\, i_{eff} \cos \varphi. \qquad 11)$$

Gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduktion (Seite 91):

$$E_s = J \omega L. \qquad 12)$$

Winkelgeschwindigkeit des Vektors einer Wechselgröße (Seite 92):

$$\omega = 2 \pi \infty. \qquad 13)$$

Zeitdauer einer Periode (Seite 92):

$$T = \frac{1}{\infty}. \qquad 14)$$

Selbstinduktionskoeffizient eines geraden Drahtes mit kreisförmigem Querschnitte:

Digitized by Google

$$L = 2\,l\left[lgn\frac{4\,l}{d} - 1 + \frac{\mu}{4}\right] \qquad 15)$$

wenn l die Länge, d die Dicke des Drahtes, μ die Permeabilität des Materiales bedeutet.

Selbstinduktionskoeffizient zweier paralleler Drähte, wenn ihre Entfernung d im Vergleich zu ihrer Länge l gering ist:

$$L = 2\,l\left(lgn\frac{2\,l}{d} - 1 + \frac{\mu}{4}\right) \qquad 16)$$

wo μ die Permeabilität des Materiales zwischen den Drähten bedeutet.

Selbstinduktionskoeffizient eines einfachen Drahtkreises, wenn die Dicke des Drahtes d, der Durchmesser des Kreises $2\,r$ (nach Bláthy):

$$L = 4\,r\,\pi\left(0{,}579 + lgn\frac{2\,r}{d} - \frac{d}{r} - \frac{d^2}{96\,r^2} - \frac{d^3}{384\,r^3} - \ldots\right). \qquad 17)$$

Eine Rolle von der Länge l und der Windungszahl n in mehreren Lagen hat den Selbstinduktionskoeffizienten L:

$$L = 4\,\pi^2\,n^4\,l\,d^2\,r^2\left(1 + \frac{d}{r} + \frac{d^2}{3\,r^2}\right) \qquad 18)$$

wenn r den inneren Halbmesser und d die radial gemessene Dicke der Wicklung bedeutet.

Selbstinduktionskoeffizient eines langen Solenoids von der Länge l, dem Halbmesser r und der Windungszahl n pro Längeneinheit:

$$L = 4\,\pi^2\,n^2\,r^2\,l. \qquad 19)$$

Der Ausdruck der Stromstärke in einem Wechselstromkreise mit Ohmschen Widerstande und Selbstinduktion (Seite 100):

$$i = \frac{e}{\sqrt{R^2 + l^2\,\omega^2}}. \qquad 20)$$

Digitized by Google

Wechselstromwiderstand bei Vorhandensein von Ohmschem Widerstande und Selbstinduktion, oder Impedanz:

$$X = \sqrt{R^2 + l^2 \omega^2}. \qquad 21)$$

Induktiver Widerstand oder Induktanz:

$$R_i = l \omega. \qquad 22)$$

Impedanz bei n Ohmschen Widerständen und Selbstinduktionen (Seite 104):

$$X = \sqrt{\sum_1^n \left(r_n\right)^2 + \omega^2 \sum_1^n \left(l_n\right)^2}. \qquad 23)$$

Stromstärke in solchen Stromkreisen bei der Spannung e:

$$i = \frac{e}{\sqrt{\sum_1^n \left(r_n\right)^2 + \omega^2 \sum_1^n \left(l_n\right)^2}}. \qquad 24)$$

Cosinus des Phasenverschiebungswinkels zwischen Strom und Spannung bei induktivem Widerstande (Seite 105):

$$\cos \varphi = \frac{i R}{i \sqrt{R^2 + l^2 \omega^2}} = \frac{e_n}{e_t}. \qquad 25)$$

Verhältnis der Stromstärken bei parallel geschalteten Impedanzen (Seite 108):

$$i_1 : i_2 = \sqrt{r_2^2 + l_2^2 \omega^2} : \sqrt{r_1^2 + l_1^2 \omega^2}. \qquad 26)$$

Zusammenhang zwischen der wattlosen, der Wattkomponente und der resultierenden Stromstärke (Seite 123):

$$i = \sqrt{i_w^2 + i_n^2}. \qquad 27)$$

Digitized by Google

Die Größe der Wattkomponente als Funktion der Leistung des Wechselstromes:

$$i_n = \frac{W}{e}. \qquad 28)$$

Erregerstromstärke aus den Dimensionen der Induktionsspule:

$$i_o = \frac{B}{\mu}\,\frac{l}{n}\,\frac{10}{4\pi}. \qquad 29)$$

Zusammenhang zwischen den Komponent- und der Gesamtspannung eines Wechselstromes (Seite 131):

$$e = \sqrt{e_n^2 + e_s^2}. \qquad 30)$$

Ohmscher Spannungsverlust:

$$e_n = i\,R \qquad 31)$$

wenn R der Ohmsche Widerstand des Leiters ist.

Kapazität eines Kondensators abhängig von den Dimensionen (S. 143):

$$c = k\,\frac{F}{4\pi d}. \qquad 32)$$

Gegenelektromotorische Kraft einer Kapazität (Seite 145):

$$e_c = \frac{i}{c\,\omega}. \qquad 33)$$

Ladestromstärke eines Kondensators von der Kapazität c:

$$i_o = c\,e_c\,\omega. \qquad 34)$$

Kapazität eines Kondensators als Funktion von Stromstärke und Spannung:

$$c = \frac{i_o}{e_c\,\omega}. \qquad 35)$$

Zusammenhang zwischen Ohmschem Spannungsverlust, Kondensatorspannung und Gesamtspannung (Seite 147):

$$e_t = \sqrt{e_n^2 + e^2{}_c}. \qquad 36)$$

Digitized by Google

Kapazitätswerte:

Konzentrische Kugeln mit den Halbmessern r_1 und r_2 haben als Kondensator die Kapazität:

$$c = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \qquad 37)$$

Zwei parallele Zylinder, wenn ihr Abstand gegen ihre Länge zu vernachlässigen ist:

$$c = \frac{l}{4 \, lgn \frac{a}{r}} \qquad 38)$$

wobei r ihren Halbmesser, l ihre Länge und a den Abstand ihrer Achsen bedeuten.

Zwei konaxiale Zylinder mit der Länge l und den Radien r_1 und r_2:

$$c = \frac{l}{2 \, lgn \frac{r_2}{r_1}}. \qquad 39)$$

Zwei parallele Platten, wenn ihr gegenseitiger Abstand a zu den linearen Abmessungen der Platten klein ist:

$$c = \frac{F}{4 \, a \, \pi} \qquad 40)$$

wenn F die Fläche einer Platte ist.

Das veränderte Ohmsche Gesetz für Stromkreise, die Ohmschen Widerstand und Kapazität besitzen (Seite 152):

$$i = \frac{e}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{c^2 \omega^2}}}. \qquad 41)$$

Kosinus des Phasenverschiebungswinkels zwischen Strom und Spannung, wenn n Ohmsche

Widerstände und Kapazitäten in Serie geschaltet sind (Seite 161):

$$\cos\varphi = \frac{\sum_{1}^{n}(r_n)}{\sqrt{\sum_{1}^{n}(r_n)^2 + \frac{1}{\omega^2}\sum_{1}^{n}\left(\frac{1}{c_n}\right)^2}}. \qquad 42)$$

Das Ohmsche Gesetz für Wechselstromkreise, welche Ohmschen Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität in Serie geschaltet enthalten (Seite 167):

$$i_t = \frac{e_t}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{c\,\omega} - l\,\omega\right)^2}}. \qquad 43)$$

Bedingungen dafür, daß in solchen Stromkreisen die Phasenverschiebung Null wird:

1) $$l = \frac{1}{c\,\omega^2} \qquad 44)$$

2) $$c = \frac{1}{l\,\omega^2} \qquad 45)$$

3) $$\omega = \frac{1}{\sqrt{c\,l}}. \qquad 46)$$

Bedingung zur Entstehung der Resonanzerscheinung (Seite 173):

$$l\,\omega - \frac{1}{c\,\omega} = 0. \qquad 47)$$

Stromstärke in der ungeteilten Leitung bei parallel geschaltetem Ohmschen Widerstande, Selbstinduktion und Kapazität (Seite 178):

$$i = \frac{e}{\sqrt{\frac{r^2 + l^2\,\omega^2}{c^2\,\omega^2\left(r^2 + \omega^2\left[l - \frac{1}{c\,\omega^2}\right]^2\right)}}}. \qquad 48)$$

Digitized by Google

Scheitelfaktor (Seite 209):

$$s = \frac{J_{max}}{i_{eff}}. \qquad 49)$$

Konstante des Elektrodynamometers als Funktion der Stromstärke und des Torsionswinkels:

$$c = \frac{i}{\sqrt{\alpha}}. \qquad 50)$$

Konstante eines Wattmeters:

$$c = \frac{Ji}{\alpha} = \frac{Je}{\alpha R}. \qquad 51)$$

Leistung eines Wechselstromes mit einem Wattmeter gemessen, je nach der Schaltung der Spannungsspule (Seite 235 und 237):

$$W = c\,\alpha\,R - \frac{e^2}{R}. \qquad 52)$$

$$W = c\,\alpha\,R - J^2 r. \qquad 53)$$

Leistungsfaktor als Funktion von Wechselstromeffekten:

$$\cos\varphi = \frac{c\,\alpha\,R - \frac{e^2}{R} - \frac{e^2}{R_v}}{i_{eff}\,e}. \qquad 54)$$

Die Bedingungen siehe auf Seite 241.

Periodenzahl eines Wechselstromes bei gegebener Impedanz:

$$\infty = \frac{1}{2\pi c\sqrt{X^2 - R^2}}. \qquad 55)$$

Digitized by Google

Namen- und Sachregister.

A.

Ampère 15.
Arago 34.
Arbeitseffekt eines Wechselstromes 75.
Arbeitsstrom 124.
— Bestimmung des, 243.
Arithmetischer Mittelwert bei zusammengesetzten Wellenformen 206.
Äquivalente Sinuskurven 195.

B.

Bedingungen der Entstehung des Induktionsstromes 8.
Bestimmung der Kapazität eines Kondensators 246.
— der Konstante eines Wattmeters 229.
— der Periodenzahl 249.
— der Phasenverschiebung 239.
— des Arbeits- und des Erregerstromes 243.
— des Formfaktors eines Wechselstromes 238.
— des Selbstinduktionskoeffizienten eines Leiters 241.

C.

Coërcitivkraft 87.

D.

Dauer des induzierten Stromes 4.
Dämpfende Wirkung 35.
Dielektrikum 136.
Dielektrische Hysteresis 155.
Dielektrizitätskonstante 136, 143.
Dimension des Selbstinduktionskoefficienten 99.
Direkte Strommessungen 216.

E.

Effektkurve 79.
Effektive elektromotorische Kraft 51, 64.
— Spannung 49.
— Stromstärke 54.
Effektivwert der zusammengesetzten Wellenformen 207.
Einheit der Kapazität 145.
Einphasiger Wechselstrom 37.
Eisenfreie Strommesser 226.
Eisenhaltige Strommesser 224.
Elektrische Resonanz 172.
Elektrodynamometer 217.
Elektromotorische Kraft der Selbstinduktion 91.
Entladestrom 151.
Erdquadrant 99.
Erregerstrom 123.
— Bestimmung des 243.
Extracurrent, Extrastrom 24.

F.

Farad 145.
Faraday 1, 11, 20, 24.
Formelsammlung 253.
Formfaktor 54, 209.
— Bestimmung des 238.

Digitized by Google

Foucaultsche Ströme 89.
Foucaultscher Verlust 84.
Fourier 196.

G.

Gegenkraft der Selbstinduktion 24.
Gegenstrom 24.
Gesetz der Induktion 11.
Graphische Darstellung der Leistung eines Wechselstromes 128.
— — der Wechselstromprobleme 56.

H.

Henry 99.
Hitzdrahtinstrument 215.
Hysteresis, dielektrische 155.
— magnetische 84, 87.
Hysteresisschleife 87.

I.

Impedanz 97.
— in Serie geschalteter Widerstände mit Selbsinduktion 100.
— parallel geschalteter Widerstände und Selbstinduktionen 105.
Induktanz 97.
Indirekte Strommessungen 216.
Induktion 1.
— in körperlichen Leitern 18, 34.
— in linearen Leitern 18.
Induktionsströme höherer Ordnung 33.
Induktionswiderstand 130.
— und Kapazität mit Ohmschem Widerstande in Serie geschaltet 161.
Induktor 3.
Induzierender Strom 3.
Induzierte elektromotorische Kraft in einem Drahtringe 30.
Induzierter Strom 3.
— Stromkreis 3.
Intensität des magnetischen Feldes 12.

K.

Kabel 148.
Kapazität, Bestimmung der 246.
— des Kondensators 136, 142.
— Induktionswiderstand, Ohmscher Widerstand in Serie geschaltet 161.
— konzentrischer Kugeln 258.
— Ohmscher Widerstand und Selbstinduktion in Parallelschaltung 174.
— und Ohmscher Widerstand in Hintereinanderschaltung 147.
— zweier konaxialer Zylinder 258.
— — paralleler Platten 258.
— — — Zylinder 258.
Kondensator 136, 148.
— im Gleichstromkreise 136.
— im Wechselstromkreise 136.
— Kapazität des 136, 142.
— und Ohmscher Widerstand in Parallelschaltung 179.
— und Ohmsche Widerstände in Hintereinanderschaltung 156.
Kondensatorspannung 139, 142.
Konstante eines Wattmeters 229.
Korrektionen bei Wattmetermessungen 232.
Kraftlinien 11.

L.

Ladestrom 151.
Leistung eines Wechselstromes 120, 128.
Leistungsfaktor 78, 195.
Leistungsmessung 219.
Lenz 11.

M.

Magnetinduktion 2.
Magnetisierungskurve 126.
Magnetische Hysteresis 84, 87.
Magnetisches Feld 11.
— — eines Drahtkreises 15.
— — eines stromdurchflossenen Leiters 13.

Digitized by Google

Maxwell 15.
Messen von Wechselströmen 211.
Meßinstrumente für Wechselstromkreise 213.
Meßmethoden 223.
Mikrofarad 145.
Mittlere Spannung 49.
— Stromstärke 54.
Momentwert 42.

O.

Ohmsches Gesetz in Wechselstromkreisen 96, 165.
Ohmsche Widerstände und Kondensatoren in Hintereinanderschaltung 156.
Ohmscher, induktiver Widerstand und Kondensator mit einem anderen Kondensator parallel geschaltet 183.
— Widerstand, Kapazität und Induktionswiderstand in Serie geschaltet 161.
— — Selbstinduktion und Kapazität in Parallelschaltung 174.
— — und Kapazität in Hintereinanderschaltung 147.
— — und Kondensator in Parallelschaltung 179.
— — und Selbstinduktion im Wechselstromkreise 84.

P.

Periode 42.
Periodenzahl 43.
— Bestimmung der, 249.
Permeabilität 126.
Phase 44.
Phasengleichheit 45.
Phasenungleichheit 45.
Phasenverschiebung 45.
— Bestimmung der, 239.
Polardiagramm 63.
Primärer Stromkreis 3.
Produkt periodisch veränderlicher Größen 71, 72.

R.

Radiusvektor 58.
Resonanz, elektrische 172.
Resultierende Stromstärke 122.
Richtung des induzierten Stromes 6, 39.
Rotationsmagnetismus 18, 34.

S.

Scheitelfaktor 209.
Sekundärer Stromkreis 3.
Selbstinduktion 22, 90.
— elektromotorische Kraft der 91.
— Gegenkraft der 24.
— Ohmscher Widerstand und Kapazität in Parallelschaltung 174.
Selbstinduktionskoeffizient 22, 92.
— Bestimmung des 241.
— Dimension des 99.
— einer Rolle 255.
— eines Drahtkreises 255.
— — geraden Drahtes 254.
— — langen Solenoids 255.
— zweier paralleler Drähte 255.
Sinuskurve 41.
— Äquivalente 195.
Spannung, effektive 49.
— mittlere 49.
Strom, Entlade- 151
— Lade- 151.
— Watt- 83.
— Wattloser 83, 123
Stromstärke, effektive 54.
— mittlere 54.
— resultierende 122.
Summation periodisch veränderlicher Größen 67, 72.

T.

Tabelle der Dielektrizitätskonstanten 143.
— — Formfaktoren 55.

U.

Uhrzeigerdiagramm 57.

Digitized by Google

V.

Vektordiagramm 57.
Verlust, Hysteresis- 84.
— Wirbelstrom (Foucaultsche)- 85.
Verschiedene Wellenformen 187.
Voltainduktion 2.

W.

Warburg 87, 190.
Wattkomponente des Wechselstromes 123, 125, 151.
Wattloser Strom 83, 123.
Wattmeter 79, 221.
— Bestimmung der Konstante eines 229.
Wattstrom 83.
Wechselstrom 40.
— Leistung eines 120.
Wechselstromkreise mit Ohmschem Widerstande und Selbstinduktion 84.
Wechselstromspannung 40.
Wechselzahl 43.
Wellendiagramm 56.
Widerstand, induktiver 130.
Wirbelstromverlust 85.
Wirbelströme 89.

Berichtigungen.

Seite	32,	6.	Zeile	v. u.	statt	Seite 30	lies	Seite 27.
„	97,	16.	„	„	„	Wechselstromes	„	Wechselstromkreises.

Digitized by Google

Elektro-technische BIBLIOTHEK.

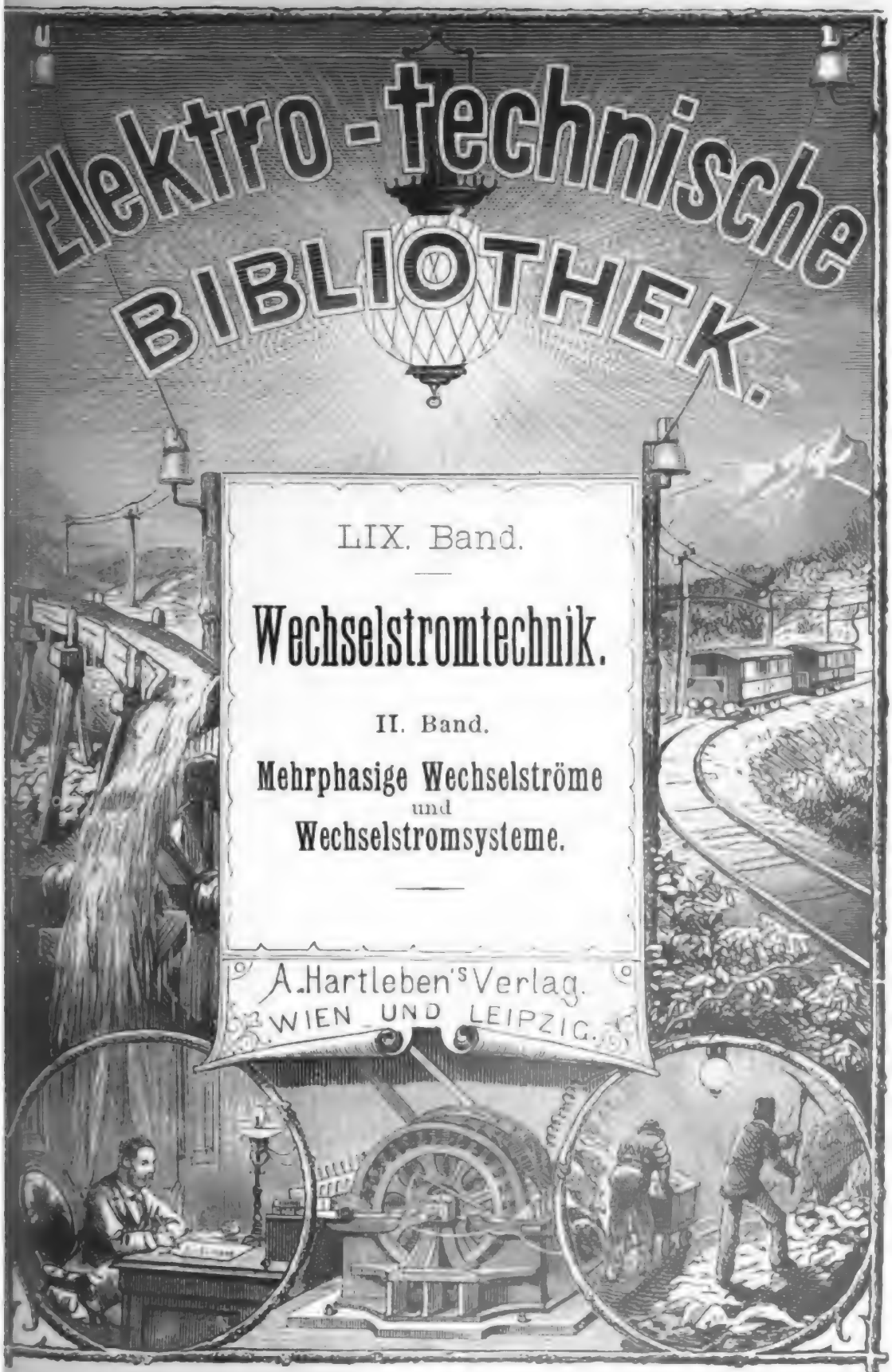
LIX. Band.

Wechselstromtechnik.

II. Band.

Mehrphasige Wechselströme
und
Wechselstromsysteme.

A. Hartleben's Verlag.
WIEN UND LEIPZIG.



Digitized by Google

A. Hartleben's Elektro-technische Bibliothek

Eine Darstellung des ganzen Gebietes

der angewendeten Elektricität nach dem Standpunkte der Gegenwart.

INHALT DER SAMMLUNG:

1. Band. Glaser-De Cew. Die dynamo-elektrischen Maschinen. Ihre Geschichte, Grundlagen Construction und Anwendungen. 6. Aufl., bearb. von Dr. F. Auerbach. — 2. Band. D elektrische Kraftübertragung und ihre Anwendung in der Praxis, mit besonderer Rücksich auf die Fortleitung und Vertheilung des elektrischen Stromes. Von Eduard Japing. 3. Aufl. – 3. Band. Das elektrische Licht. Von Dr. A. v. Urbanitzky. 3. Aufl. — 4. Band. Die galva nischen Batterien, Accumulatoren und Thermosäulen. Eine Beschreibung der hydro- un thermo-elektrischen Stromquellen, mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Vo W. Ph. Hauck. 4. Aufl. — 5. Band. Die Verkehrs-Telegraphie, mit besonderer Rücksicht auf d Bedürfnisse der Praxis. Von J. Sach. — 6. Band. Telephon, Mikrophon und Radiophon, m besonderer Rücksicht auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von Theodor Schwartze. 3. Auf lage. — 7. Band. Die Elektrolyse, Galvanoplastik u. Reinmetallgewinnung, mit besondere Rücksicht auf ihre Anwendung in der Praxis. Von Eduard Japing. 2. Aufl. — 8. Band. D elektrischen Mess- u. Präcisions-Instrumente. Ein Leitfaden der elektrischen Messkunde. Vo A. Wilke. 2. Aufl. — 9. Band. Die Grundlehren der Elektricität, mit besonderer Rücksich auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von W. Ph. Hauck. 3. Aufl. — 10. Band. Elektrische Formelbuch mit einem Anhange, enthaltend die elektrische Terminologie in deutscher, franz und englischer Sprache. Von Prof. Dr. P. Zech. — 11. Band. Die elektrischen Beleuchtungs Anlagen, mit besonderer Berücksichtigung ihrer praktischen Ausführung. Von Dr. A. v. Urba nitzky. 3. Aufl. — 12. Band. Die elektrischen Einrichtungen der Eisenbahnen und da Signalwesen. Von L. Kohlfürst. — 13. Band. Die elektrischen Uhren und die Feuerwehr Telegraphie. Von Dr. A. Tobler. — 14. Band. Die Haus- u. Hôtel-Telegraphie. Von O. Canter 2. Aufl. — 15. Band. Die Anwendung der Elektricität für militärische Zwecke. Von Dr. Fr Waechter. — 16. Band. Die elektrischen Leitungen und ihre Anlage für alle Zwecke der Praxis. Von J. Zacharias. 2. Aufl. — 17. Band. Die elektrische Eisenbahn bezüglich ihre Baues und Betriebes. Von Jos. Krämer. — 18. Band. Die Elektro-Technik in der prakt. Heil kunde. Von Prof. Dr. Rud. Lewandowski. — 19. Band. Die Spannungs-Elektricität, ihr Gesetze, Wirkungen und technischen Anwendungen. Von Prof. K. W. Zenger. — 20. Band. Die Weltliteratur der Elektricität und des Magnetismus, 1860—1883. Von Gustav May. – 21. Band. Die Motoren der elektr. Maschinen mit Bezug auf Theorie, Construction und Betrieb. Von Theodor Schwartze. — 22. Band. Die Generatoren hochgespannter Elektricität. Von Prof. Dr. J. G. Wallentin. — 23. Band. Das Potential und seine Anwendung zur Erklärung elektrischer Erscheinungen. Von Dr. O. Tumlirz. — 24. Band. Die Unterhaltung und Repa ratur der elektr. Leitungen. Von J. Zacharias. — 25. Band. Die Mehrfach-Telegraphie auf Einem Drahte. Von A. E. Granfeld. — 26. Band. Die Kabeltelegraphie. Von Max Jüllig. – 27. Band. Das Glühlicht, sein Wesen und seine Erfordernisse. Von Etienne de Fodor. — 28. Band. Geschichte der Elektricität. Von Dr. Gust. Albrecht. — 29. Band. Blitz und Blitz-Schutz vorrichtungen. Von Dr. A. v. Urbanitzky. — 30. Band. Die Galvanostegie mit besonderer Berücksichtigung der fabriksmässigen Herstellung von Metallüberzügen. Von Josef Schaschl. – 31. Band. Die Technik des Fernsprechwesens. Von Dr. V. Wietlisbach. — 32. Band. Die elektro-technische Photometrie. Von Dr. Hugo Krüss. — 33. Band. Die Laboratorien der Elektro-Technik. Von Aug. Neumayer. — 34. Band. Elektricität und Magnetismus im Alterthume. Von Dr. A. v. Urbanitzky. — 35. Band. Magnetismus u. Hypnotismus. Von G W. Gessmann. 2. Aufl. — 36. Band. Die Anwendung der Elektricität bei registrirenden Appa raten. Von Dr. Ernst Gerland. — 37. Band. Elektricität und Magnetismus als kosmotelu rische Kräfte. Von Dr. Theodor Hoh. — 38. Band. Die Wirkungsgesetze der dynamo-elektr Maschinen. Von Dr. F. Auerbach. — 39. Band. Materialien für Kostenvoranschläge elektr Lichtanlagen. Von Etienne de Fodor. — 40. Band. Die Zeittelegraphen und die elektr. Uhren vom praktischen Standpunkte. Von Ladislaus Fiedler. — 41. Band. Die elektrischen Motoren mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Strassenbahnen. Von Etienne de Fodor. – 42. Band. Die Glühlampe. Ihre Herstellung und Anwendung in der Praxis. Von J. Zacharias — 43. Band. Die elektrischen Verbrauchsmesser. Von Etienne de Fodor. — 44. Band. Die elektrische Schweissung und Löthung. Von Etienne de Fodor. — 45. Band. Die elektrischen Accumulatoren und ihre Verwendung in der Praxis. Von J. Sack. — 46. Band. Elektricität direct aus Kohle. Von Etienne de Fodor. — 47., 48., 49. und 50. Band. Angewandte Elektro chemie. In 4 Bänden. Von Dr. Franz Peters. 1. Band, Die Primär- und Secundär-Elemente 2. Band. I. und II. Abthlg., Anorganische Elektrochemie. 3. Band. Organische Elektrochemie — 51. und 52. Band. Materialistisch-hypothetische Sätze und Erklärung des Wesens und de Kraftäusserungen des elektrischen Fluidums. In zwei Bänden. Von Dr. F. Ph. Stögermayr — 53., 54., 55. und 56. Band. Elektrometallurgie und Galvanotechnik. Ein Hand- u. Nachschlage buch für die Gewinnung und Bearbeitung der Metalle auf elektrischem Wege. In vier Bänden Von Dr. Fr. Peters. — 57. Band. Elektrische Straßenbahnen. Von Johannes Zacharias. – 58., 59. Band. Wechselstromtechnik. Von M. T. Zsakula. I. Band. Der einphasige Wechsel strom. II. Band. Mehrphasige Wechselströme und Wechselstromsysteme — u. s. w., u. s. w.

Pro Band geheftet à 3 *K* 30 *h* = 3 Mark. Gebunden à 4 *K* 40 *h* = 4 Mark. Ab Band 57 pr Band geheftet à 4 *K* 40 *h* = 4 Mark. Gebunden à 5 *K* 50 *h* = 5 Mark.

Jeder Band ist für sich vollkommen abgeschlossen und einzeln käuflich.

Wechselstromtechnik.

II. Band.

Mehrphasige Wechselströme und Wechselstromsysteme.

Von

M. T. ZSAKULA

dipl. Maschineningenieur, Assistent an der techn. Hochschule in Budapest.

Mit 89 Abbildungen.

WIEN und LEIPZIG.

A. HARTLEBEN'S VERLAG.

1904.

(Alle Rechte vorbehalten.)

Digitized by Google

302755

K. u. k. Hofbuchdruckerei Carl Fromme in Wien.

Digitized by Google

Inhalt.

Seite

I. Kapitel. Mehrphasige Wechselströme 1

II. Kapitel. Der zweiphasige Wechselstrom 19
Drehfeld bei zweiphasigem Wechselstrom. Zweiphasenstrom in Parallelschaltung. Zweiphasige Ströme in Serienschaltung. Vierphasenströme in offener Verkettung. Phasenverhältnisse.

III. Kapitel. Der dreiphasige Wechselstrom 50
Erzeugung des Drehstromes. Strom- und Spannungsverhältnisse bei den verschiedenen Drehstromschaltungen. Dreieckschaltung. Sternschaltung. Leistung des dreiphasigen Wechselstromes. Zusammenhang zwischen der Drehstrom- und der Gleichstromspannung und Stromstärke im Falle, wenn der Drehstrom aus einer Gleichstromarmatur erzeugt wird. Magnetisches Feld eines Drehstromes.

IV. Kapitel. Verschiedene Mehrphasenstromsysteme 101
Der fünfphasige Wechselstrom. Sechsphasige Stromkreise. Achtphasiger Wechselstrom. Zwölfphasiger Wechselstrom. Allgemeiner Fall.

V. Kapitel. Schaltungen bei Mehrphasenstromsystemen 134
Einiges über Wechselstromleitungen. Kapazität. Phasenverhältnisse. Mehrphasenleitungen. Berechnung des Querschnittes einer Drehstromleitung. Spannungsverluste in Wechselstromleitungen. Vergleich des benötigten Kupfervolumens bei verschiedenen Stromsystemen. Wechselstromsysteme. Monocyclic System. Kombiniertes Verteilungssystem für Gleich- und Wechselstrom. Schaltungsweise zur Umwandlung des zweiphasigen Wechselstromes in Drehstrom.

VI. Kapitel. Formelsammlung 206

Namen- und Sachregister 214

Digitized by Google

Mehrphasige Wechselströme und Wechselstromsysteme.

I. Kapitel.

Mehrphasige Wechselströme.

Im vorgehenden Bande haben wir uns mit den Grundlehren des einphasigen oder gewöhnlichen Wechselstromes befaßt. Wir sahen, daß dieser Wechselstrom graphisch durch eine, von der Sinuslinie mehr-weniger abweichende Kurve dargestellt werden kann, doch wurde über die Verwendbarkeit dieses Stromes nichts erwähnt. Dies werden wir bei der Beschreibung der Wechselstrom-Generatoren und -Motoren tun, hier sei nur auf jene Eigenschaft hingewiesen, welche verursachte, daß man durch verschiedene Methoden sogenannte Mehrphasenströme zu erzeugen bestrebt war, welche in neuerer Zeit immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Der einphasige Wechselstrom läßt sich für Beleuchtungszwecke ebenso gut verwenden als der Gleichstrom, nur darf die Periodenzahl desselben nicht zu klein gewählt werden. Der Wechselstrom ändert in jeder Periode zweimal seine Richtung, wächst von Null bis zu einem Maximalwert an, nimmt dann wieder ab, wird zu Null, dann wiederholt sich diese Veränderung auch für die zweite Hälfte der Periode, nur in entgegengesetzter Richtung. Die Lichtwirkung hängt von der jeweiligen Größe der Spannung und der Stromstärke ab, ihre Intensität wechselt also auch

Digitized by Google

periodisch. Die Ursache, daß man von dieser periodischen Änderung trotzdem nichts bemerkt, ist darin zu suchen, daß die Lichteindrücke auf der Netzhaut des Auges eine gewisse Zeit lang bestehen und ist die Periodenzahl groß genug, dann empfängt das Auge die Lichtstrahlen verschiedener Intensitäten so rasch, daß es die einzelnen Lichteindrücke voneinander nicht mehr unterscheiden kann und es entsteht der Eindruck einer kontinuierlichen Lichtemission. Wenn in den Wechselstromkreis Glühlampen mit sehr dünnen Kohlenfäden eingeschaltet sind, dann kühlt dieser Faden bei abnehmender Stromstärke ziemlich rasch ab, so daß bei nur etwas niedrigerer Periodenzahl die Empfindlichkeit des Auges schon ausreicht, die Lichtstärkeschwankungen wahrzunehmen.

Dieser Umstand ist immerhin kein nachteiliger, denn es ist ein leichtes, Wechselströme von genügend großer Periodenzahl herzustellen.

In der Beleuchtungstechnik ist der Wechselstrom dem Gleichstrome allerdings überlegen, denn in Fällen, wo man die zur Beleuchtung nötige elektrische Energie aus weiter Ferne beziehen muß, ist bei direkter Energieübertragung die Anwendung des Gleichstromes ausgeschlossen. Der Gleichstrom läßt sich mit hoher Spannung nur mit Schwierigkeit herstellen, auch ist die Transformierung dieser Spannung auf die Lampenspannung umständlich. Die Verwendung einer niederen Spannung ist aber wegen der auftretenden großen Verluste in den Fernleitungen oder wegen der allzugroßen Investitionen im vorhinein ausgeschlossen. Mit Wechselstrom läßt sich dieses Problem sehr einfach und ökonomisch lösen, indem man am Orte der billigen Energiequelle hochgespannten Wechselstrom herstellt, diesen in die Fernleitung schickt und ihn an den Verbrauchsstellen mittels ruhender Transformatoren auf die

gewünschte Spannung transformiert. Hierbei ist noch zu bemerken, daß diese Transformatoren sehr hohen Nutzeffekt haben und keinerlei Bedienung während des Betriebes erheischen.

Ein Nachteil des einphasigen Wechselstromes dem Gleichstrome gegenüber besteht darin, daß der Wechselstrom zu Arbeitsübertragungen nicht in dem Maße geeignet ist als der Gleichstrom. Wie wir später sehen werden, lassen sich zwar einphasige Wechselstrommotoren mit gutem Wirkungsgrad und großen Leistungen bauen, doch ist ihre Inbetriebsetzung insofern schwierig, da sie allein entweder nicht anlaufen und dementsprechend für den Anlauf besondere Einrichtungen nötig sind oder aber wenn sie auch selbst anlaufen, beim Anlauf große Stromstärke benötigen und dabei ein kleines Drehmoment besitzen.

Die größeren einphasigen Wechselstrommotoren sind gewöhnlich Synchronmotoren, die nur dann arbeitsfähig sind, wenn sie die von der Periodenzahl des zugeführten Wechselstromes und ihrer Polzahl abhängende Tourenzahl erreicht haben, d. h. wenn sie in Synchronismus sind. Ihre Tourenzahl bleibt bei gleichbleibender Periodenzahl unabhängig von der Belastung konstant, wächst aber die Belastung über eine gewisse Grenze, dann fallen sie aus dem synchronen Gange und bleiben stehen. Solche Motoren arbeiten also nur mit einer Tourenzahl, sind sie einmal aus dem synchronen Gange gefallen, dann müssen sie wieder zuerst an diese Tourenzahl gebracht werden, was gewöhnlich sehr umständlich ist und bei den Schaltungen große Aufmerksamkeit erfordert. Erst nachdem die Tourenzahl erreicht ist, kann die Belastung des Motors stufenweise angelegt werden.

Diesem Übelstande abzuhelfen und die Vorzüge der billigen Arbeitsübertragung mit den Vorteilen guter Wechselstrommotoren zu vereinigen,

waren die Elektrotechniker von jeher bemüht und es gelang auch ihren Bemühungen, mit der Zeit Wechselstrommotoren herzustellen, welche in jeder Hinsicht mit den Gleichstrommotoren gleichwertig sind und dadurch der Verbreitung und Anwendung des Wechselstromes bei Arbeitsübertragungen immer größere Gebiete zu erschließen.

Das Mittel, welchem diese Fortschritte zu verdanken sind, ist der mehrphasige Wechselstrom. Der mehrphasige Wechselstrom ist die Kombination

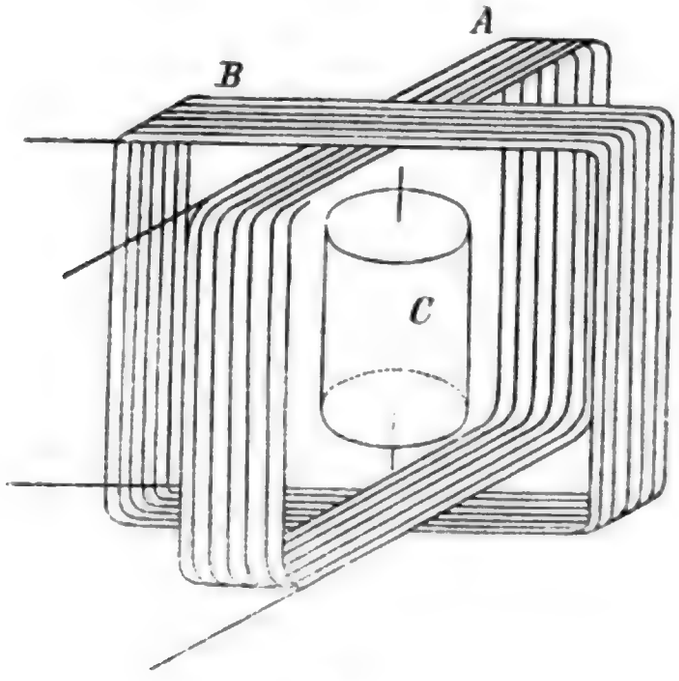


Fig. 1.

mehrerer gewöhnlicher einphasiger Ströme und je nachdem zwei, drei oder im allgemeinen n Wechselströme zu einem Stromsystem vereinigt werden, unterscheidet man zwei-, drei-, beziehungsweise n-phasigen Wechselstrom. Die ein Stromsystem bildenden Teilströme stehen miteinander in bestimmten Beziehungen; diese Beziehungen feststellen, sowie die Gesetze der mehrphasigen Ströme zu ermitteln, ist nun unsere Aufgabe.

Was die historische Entwicklung der Anwendung der mehrphasigen Ströme betrifft, gebührt

Galileo Ferraris und Nikola Tesla das Verdienst, die ersten gewesen zu sein, die auf diesem Gebiete die ersten Veröffentlichungen gemacht haben.

Im Jahre 1888 veröffentlichte Ferraris die Ergebnisse eines Versuches, welchen er folgendermaßen ausführte.

Er leitete in zwei, mit ihren Ebenen aufeinander senkrecht stehenden flachen Drahtspulen (Fig. 1) *A* und *B* zwei solche Wechselströme, welche in ihren Phasen gegeneinander um eine Viertelperiode verschoben waren. In der gemein-

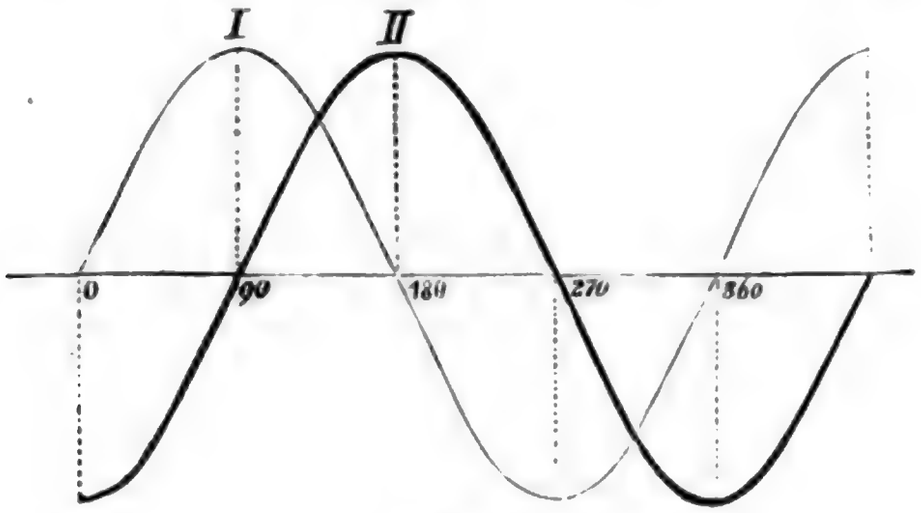


Fig. 2.

samen Achse der Drahtspulen war ein Kupferzylinder *c* dermaßen angebracht, daß er sich um eine vertikale Achse drehen konnte. Sobald nun durch beide Spulen Wechselströme flossen, fing der Zylinder an sich zu drehen, seine Winkelgeschwindigkeit nahm immer mehr bis zu einem konstanten Werte zu. Wurden die Zuleitungen einer Spule vertauscht, dann änderte sich die Drehrichtung des Kupferzylinders.

Das Experiment gelang auch dann, wenn anstatt des Kupferzylinders ein Eisenkern verwendet wurde, welcher mit in sich geschlossenen Kupferdrahtwindungen versehen war.

Was die Ursache ist, daß bei diesem Experiment der Kupferzylinder oder der Eisenkern in Rotation kommen, werden wir später beschreiben; verfolgen wir hier weiter die Entwicklung und Ausnutzung der mehrphasigen Stromsysteme.

Damit das Experiment von Ferraris gelingt, sind unbedingt zwei Wechselströme nötig, welche in der Phase um eine Viertelperiode oder nahezu eine Viertelperiode verschoben sind. Auch muß

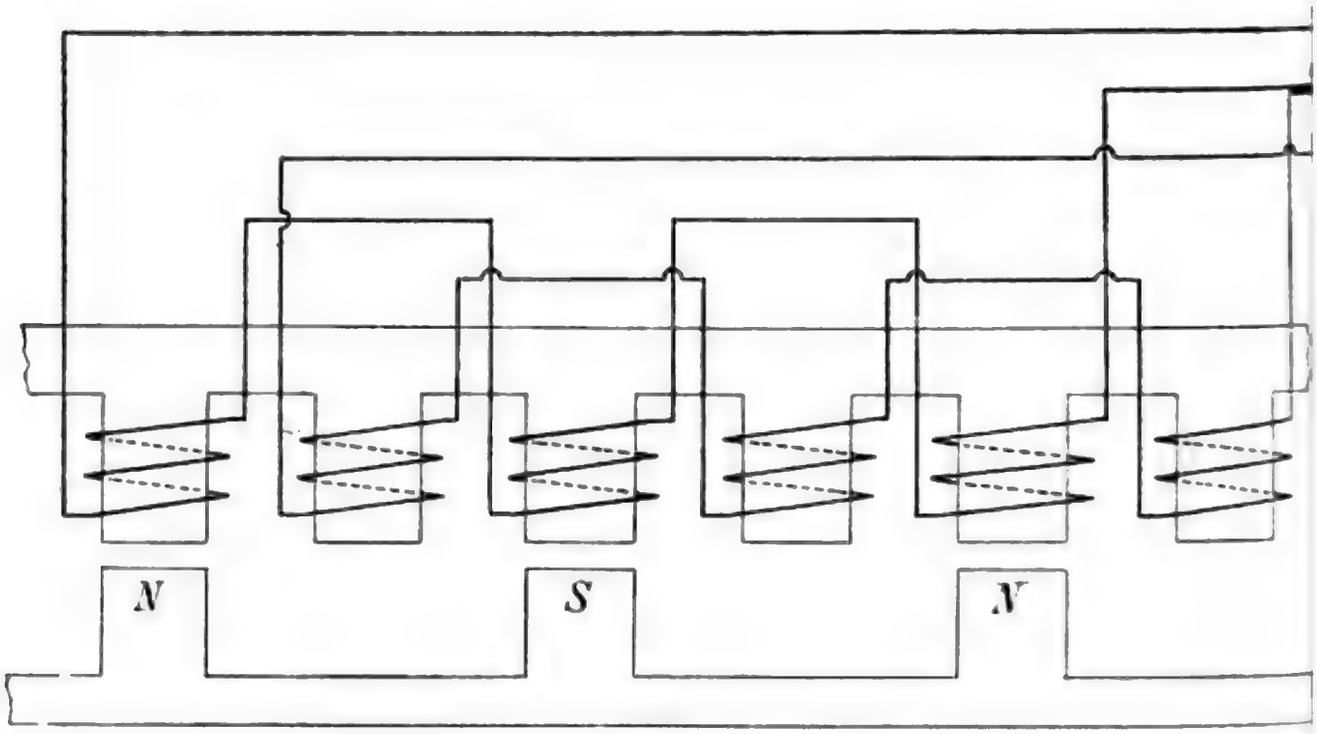


Fig. 3.

diese Phasenverschiebung immer bestehen und konstant bleiben.

In graphischer Darstellung sind diese Ströme in Fig. 2 ersichtlich.

Der erste Wechselstrom fängt bei Ø an, ist mit *I* bezeichnet und vollführt bei 360° eine volle Periode. Der zweite Wechselstrom, gleichfalls durch eine Sinuskurve dargestellt, ist mit *II* bezeichnet, hat seinen Nullwert in jenem Zeitpunkt, in welchem *I* maximal ist und erreicht sein Maximum erst dann, als *I* bereits wieder Null geworden

ist. Dieser Strom ist also dem ersteren gegenüber in der Phase um eine Viertelperiode oder 90^0 verschoben.

Solche Wechselströme hat schon Gramme in den Siebzigerjahren mit seiner Maschine hergestellt, doch benutzte er sie voneinander gesondert, als zwei gewöhnliche Wechselströme.

Zwei Ströme, welche in der Phase gegeneinander um eine Viertelperiode verschoben sind und ein zusammenhängendes Stromsystem bilden, nennt man Zweiphasenströme. Diese bilden einen Teil des mit der Bezeichnung Mehrphasenströme benannten Gesamtbegriffes.

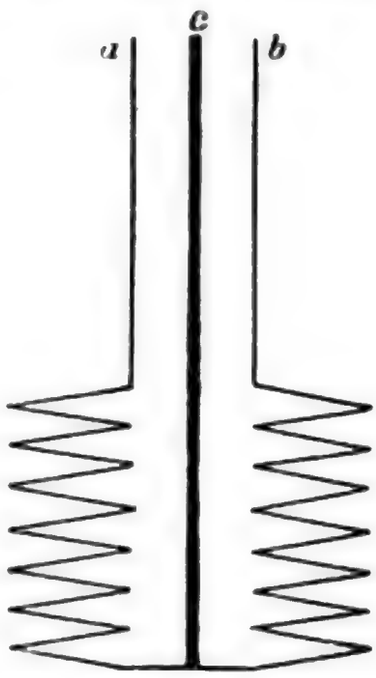


Fig. 4.

In analoger Weise kann auch von Drei-, Vier-, Sechs- etc. Phasenströmen die Rede sein, worunter man dann drei, vier, beziehungsweise sechs gewöhnliche Wechselströme versteht, welche in der Phase gegeneinander verschoben sind und zusammen ein Stromsystem bilden. Mit den Gesetzen solcher Stromkreise werden wir uns später eingehender befassen.

Außer Gramme findet man noch bei Schellen (Die magnetelektrischen und dynamoelektrischen Maschinen) und bei S. P. Tompson (Dynamo-Electric-Maschinery) Aufzeichnungen, in welchen auf die Herstellung mehrerer in der Phase verschobener Wechselströme hingewiesen wird.

Im Jahre 1889 wurde Zipernowsky und Déri ein Patent erteilt, mit welchem ein Verfahren geschützt wird, das Strom- und Energieverteilung mit mehreren phasenverschobenen Strömen bezweckt.

Die Erzeugung solcher Ströme erfolgt nach der Patentschrift in folgender Weise.

Fig. 3 ist ein Teil eines Wechselstromgenerators, welcher zwei, in der Phase um eine Viertelperiode verschobene Wechselströme erzeugt. N, S, N sind die Pole eines Elektromagneten, welcher vor den Polen einer feststehenden Armatur sich bewegt. Diese Pole sind mit Windungen versehen, welche untereinander in der eingezeichneten Weise verbunden sind. Die Anzahl der Armaturspulen ist doppelt so groß als diejenige des mit Gleichstrom erregten rotierenden Magnetkranzes,

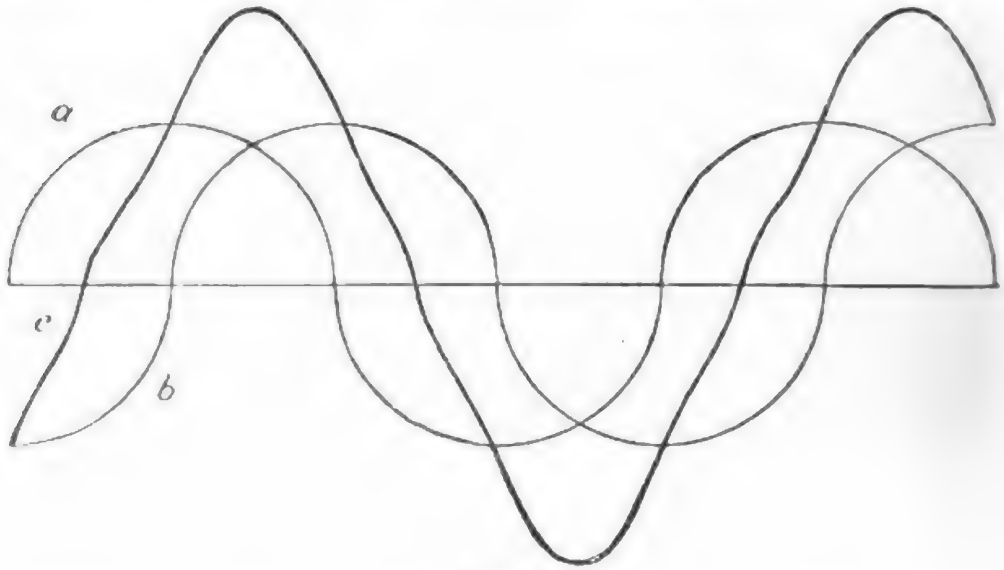


Fig. 5.

wodurch erreicht wird, daß nur jeder zweiten Armaturspule gegenüber ein Magnetpol steht, während die übrigen Armaturspulen in die Teilebenen der Elektromagnete zu liegen kommen.

Durch diese Anordnung der Spulen wird erreicht, daß zwei Wechselströme induziert werden, die in der Phase um 90^0 verschoben sind. In Fig. 3 müßte man zur Fortleitung der beiden Wechselströme insgesamt vier Leiter anwenden, doch läßt sich die Schaltung so ausführen, daß nur drei Leiter genügen. Diese Schaltung ist in Fig. 4 schematisch dargestellt.

Digitized by Google

Der Mittelleiter *c* führt zwei Ströme, welche sich zu einer Resultierenden summieren. Diese Summation darf nicht arithmetisch durchgeführt werden, denn die Komponentströme sind nicht

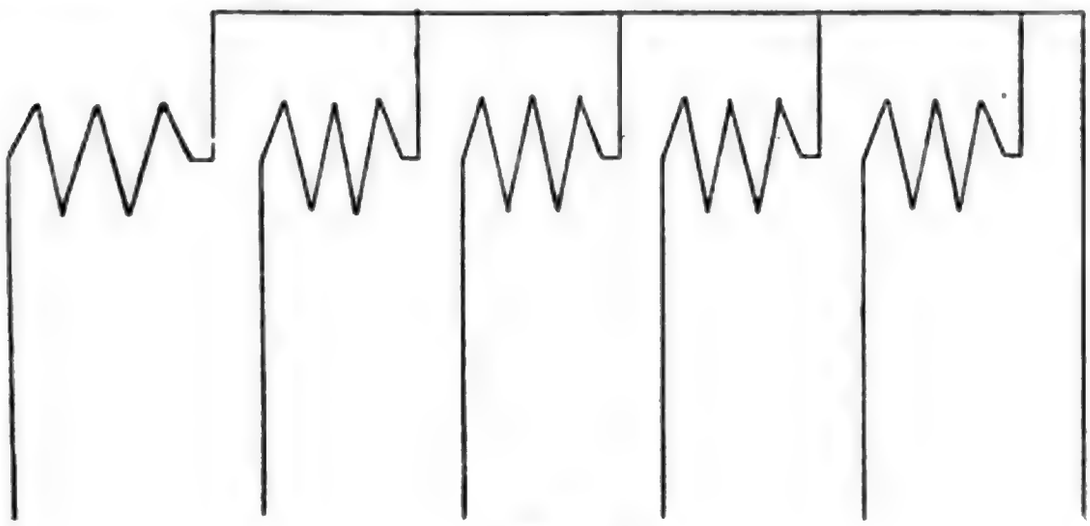


Fig 6.

phasengleich. Naturgemäß muß auch der Mittelleiter einen größeren Querschnitt als die beiden Außenleiter haben. Der Verlauf des resultierenden Stromes ist aus Fig. 5 ersichtlich.

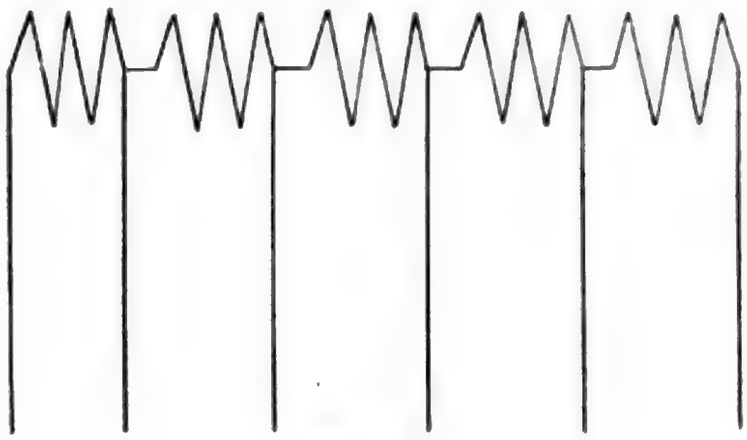


Fig. 7.

In dieser Patentschrift ist auch von solchen Schaltungen bereits Erwähnung getan, welche mehrere, in der Phase um $\frac{1}{6}$ Periode verschobene Wechselströme liefern und auch im allgemeinen von

solchen die Rede, bei denen der Phasenunterschied $\frac{1}{n}$ Periode ist und n Wechselströme zur Verfügung stehen.

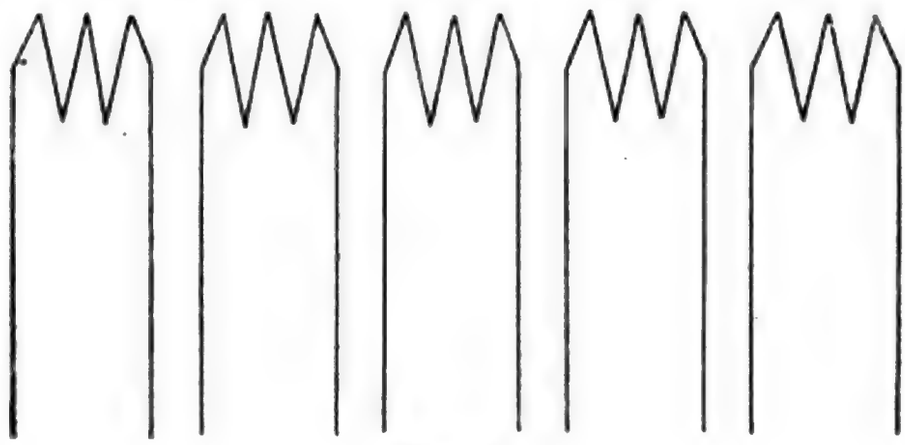


Fig. 8.

Ist die Anzahl der Wechselströme n, dann kann man diese entweder mit $2n$ oder im günstigsten Falle mit $n+1$ Leiter fortleiten.

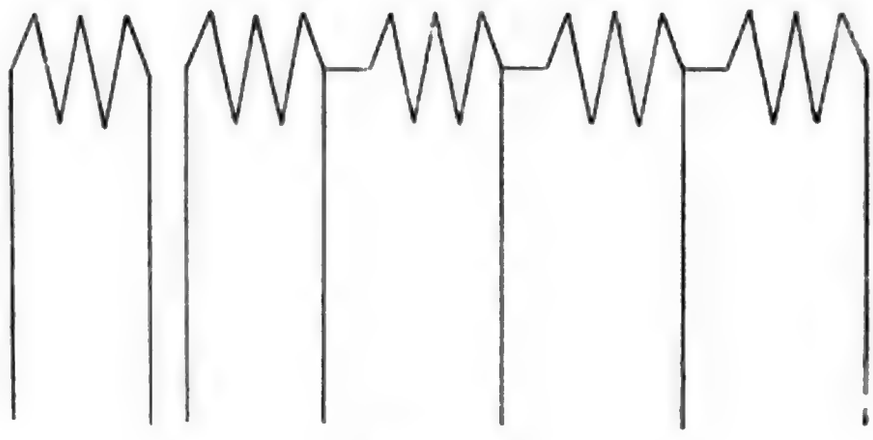


Fig. 9.

In Fig. 6 ist eine Schaltung mit $n+1$ Leiter dargestellt, sowie auch in Fig. 7, während die Fig. 8 eine Schaltung zeigt, bei welcher die Zahl der Leiter $2n$ beträgt. Man kann diese beiden Schaltungsweisen miteinander kombinieren, wodurch man Schaltungsanordnungen bekommt, bei denen die Anzahl der Leiter zwischen $n+1$ und

$2n$ liegt. Eine solche Schaltungsanordnung ist aus Fig. 9 ersichtlich. Bei allen diesen Schaltungen bedeuten die gebrochenen Linien die Armaturspulen.

Diese Patentbeschreibung erwähnt weiters folgende Methode, um zwei gegeneinander in Phase verschobene Ströme herzustellen.

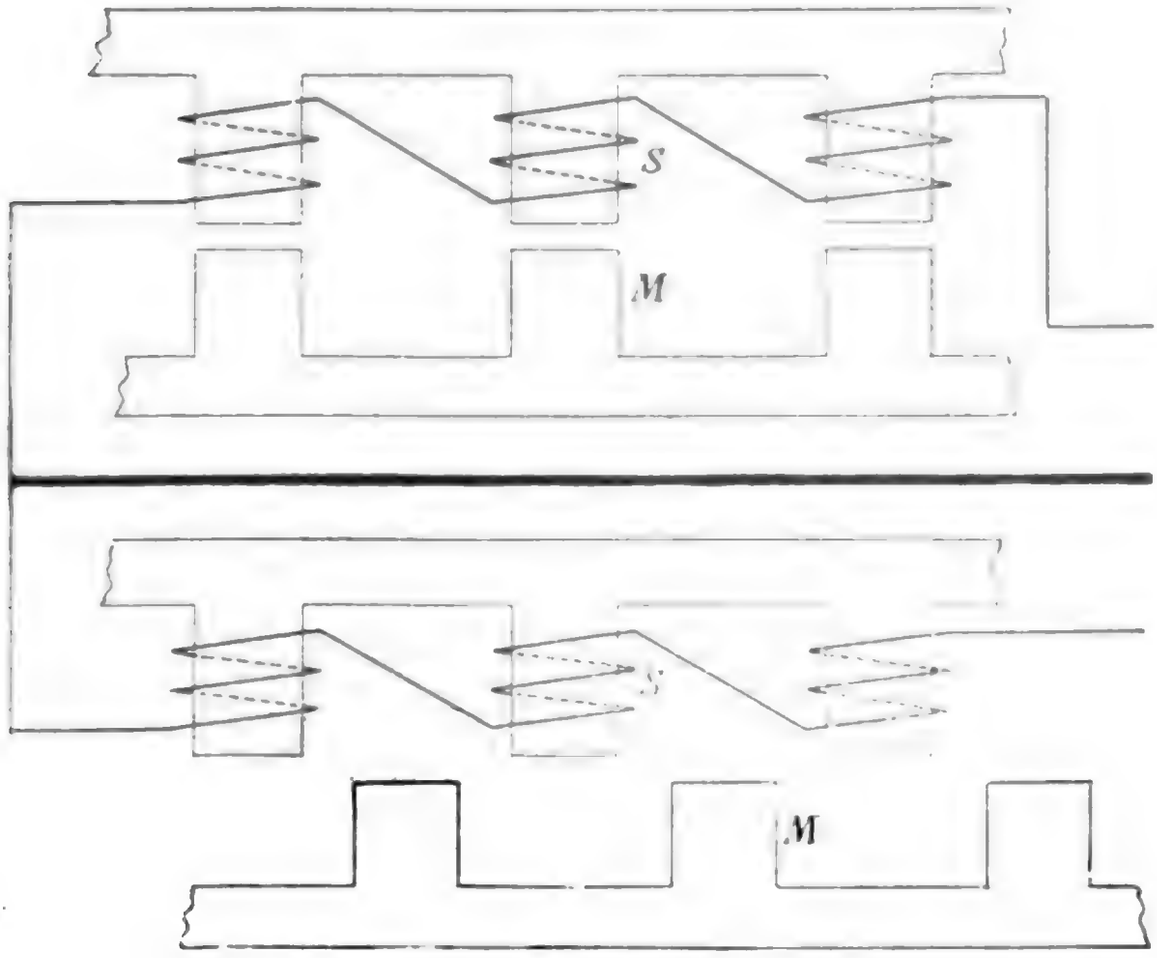


Fig. 10.

Zwei Generatoren mit gleicher Armaturspulen- und Magnetpolzahl sind miteinander starr verbunden, jedoch sind die Magnetpole so verschoben, daß, wenn bei einer Maschine die Pole der Armaturspulen den Magnetpolen gerade gegenüberstehen, bei der anderen Maschine die Magnetpole zwischen zwei Armaturspulen zu liegen kommen (s. Fig. 10). Die Armaturspulen sind $S\,S$, die

Magnetpole *M M*. Die Schaltung ist so ausgeführt, daß zur Fortleitung des Stromes drei Leiter dienen.

Will man n Ströme herstellen, bei denen zwischen zwei nacheinander folgenden die Phasenverschiebung $\frac{360}{2n}$ beträgt, dann benutzt man n miteinander in starrer Verbindung stehende Generatoren, deren Elektromagnete um je den $\frac{1}{n}$ Teil jenes Winkels verschoben sind, welchen zwei auf-

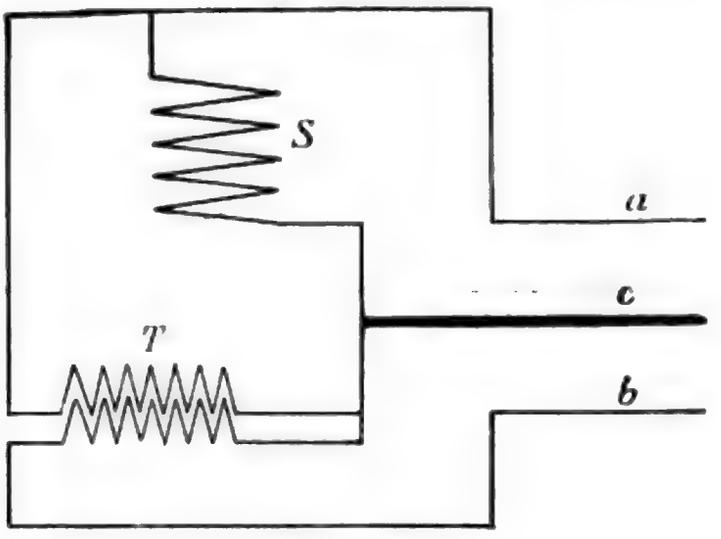


Fig. 11.

einander folgende Magnetpole miteinander bilden.

Solche Maschinengruppen können untereinander parallel geschaltet werden und variiert die benötigte Leiterzahl je nach der Schaltung zwischen $2n$ und $n+1$.

Phasenverschobene Ströme werden auch dadurch erzeugt, daß man einen gewöhnlichen einphasigen Wechselstrom produzierenden Alternator benutzt und den Wechselstrom teilt. Ein Teil fließt unverändert in die Hauptleitung, während der andere Teil in die Primärwicklung eines Transformators geführt wird. In der Sekundärwicklung wird ein Strom induziert, welcher zum

Digitized by Google

induzierenden, also zum Hauptstrome phasenverschoben ist, und dieser Strom wird dann nach der in Fig. 11 angedeuteten Schaltung in die Hauptleitung geschickt. In der Figur sind drei Leitungen benutzt: man könnte aber vier gesonderte Leitungen auch benutzen. S ist die Armaturspule des Alternators, T der den phasenverschobenen Strom herstellende Transformator.

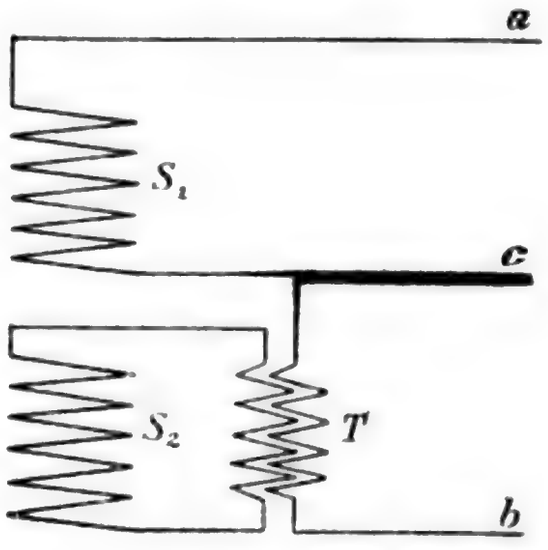


Fig. 12.

Endlich sind in den Fig. 12 und 13 noch zwei Schaltungen dargestellt, welche denselben Zweck anstreben. In Fig. 12 bedeuten S_1 und S_2 zwei Spulengruppen desselben Alternators oder sämtliche Spulen zweier Alternatoren. S_1 liefert den Strom direkt für den Hauptstromkreis, S_2 für einen Transformator T, dessen zweite Wicklung mit der Hauptleitung in Verbindung steht. Die Wirkungsweise des Transformators ist dieselbe wie bei Fig. 11.

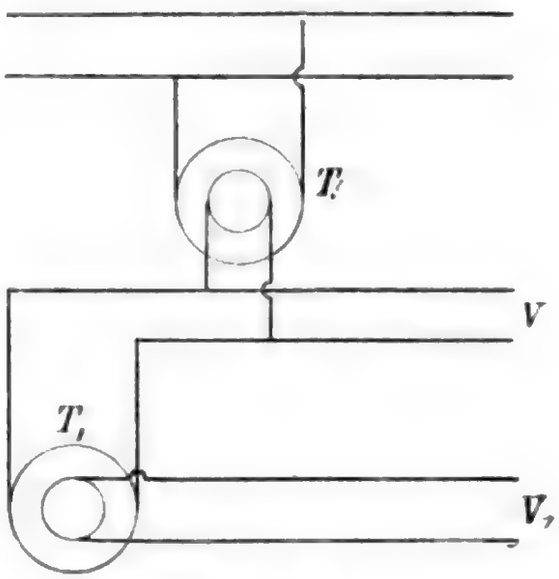


Fig. 13.

Mit zwei Transformatoren und einphasigem Wechselstrom erreicht man denselben Zweck. Aus der Alternatorleitung fließt der Gesamtstrom in den Transformator T, dessen Sekundärstrom die eine Phase der herzustellenden phasenverschobenen Ströme bildet. Ein Teil dieses Stromes wird in die Primärwicklung eines zweiten

Transformators T_1 geleitet, welcher dann durch den induzierten Sekundärstrom den zweiten phasenverschobenen Strom liefert. Die phasenverschobenen Ströme fließen demnach in den Leitungen V und V_1. Eine Variation dieser Schaltung ist aus Fig. 14 ersichtlich.

Durch diese Methoden kann man phasenverschobene Ströme herstellen, deren Spannungen gleich oder verschieden sind, je nachdem das Transformationsverhältnis der Transformatoren gleich, beziehungsweise verschieden sind.

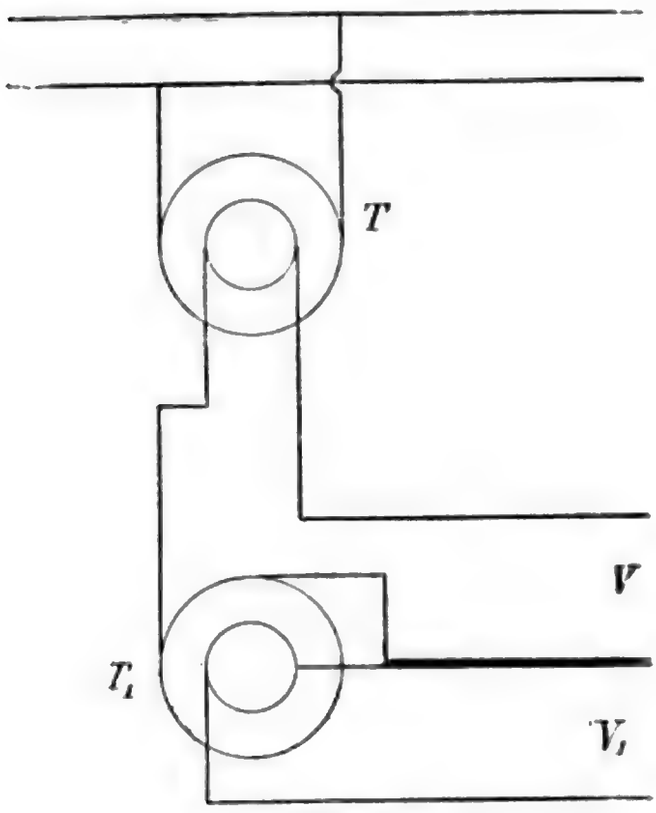


Fig. 14.

Nikola Tesla und Charles S. Bradley ließen sich im Jahre 1888 Methoden patentieren, welche auf die Erzeugung von Zweiphasenströmen sich beziehen.

Tesla erzeugt den Zweiphasenstrom aus einer eigens zu diesem Zwecke konstruierten Maschine, welche in ihrer einfachsten Ausführung zwei Magnetpole und zwei aufeinander senkrecht stehende Armaturspulen hat. Der erzeugte Wechselstrom wird zu vier Schleifringen geführt, auf welchen mit dem äußeren Stromkreis in Verbindung stehende Federn schleifen (Fig. 15).

Im bezeichneten Zeitmomente ist die Ebene der Spule I parallel zu den magnetischen Kraftlinien, folglich ist in dieser Lage bei Drehung die Veränderung der Kraftlinienzahl in der durch die Windungen umschlossenen Fläche eine maximale,

wodurch auch die induzierte elektromotorische Kraft ein Maximum wird. Im selben Zeitpunkte ist aber die Ebene der Spule *II* senkrecht auf die Richtung der Kraftlinien, in dieser wird also die induzierte elektromotorische Kraft Null sein. Nach 90° Drehung sind die Verhältnisse entgegengesetzt, d. h. jetzt wird in *II* die induzierte elektromotorische Kraft maximal und in *I* Null. In jeder Spule wird also ein Wechselstrom induziert, diese Ströme sind aber in der Phase um 90° verschoben, oder nachdem auch von Perioden die Rede sein kann, ist die Phasenverschiebung eine Viertelperiode.

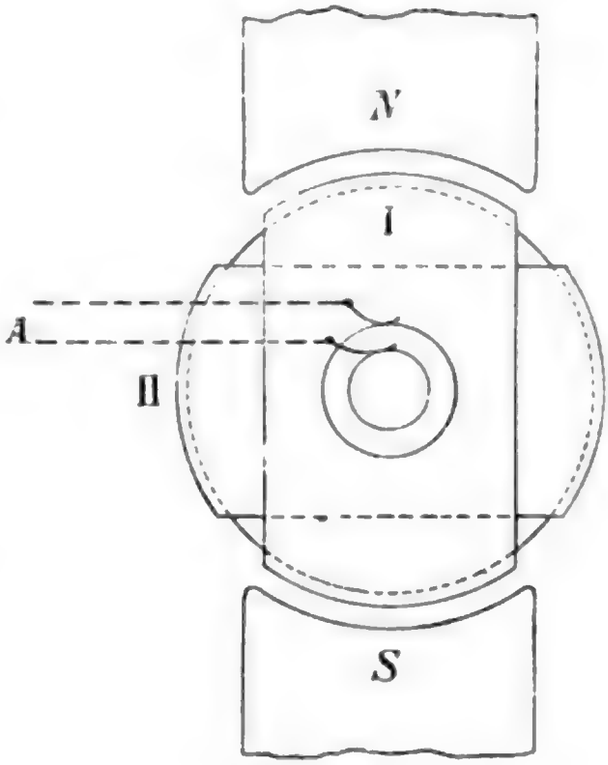


Fig. 15.

Bradleys Einrichtung zur Erzeugung von Zweiphasenströmen basiert auf folgender Überlegung. Jede Gleichstrommaschine erzeugt in den Armaturwindungen Wechselströme, welche durch den Kollektor gleichgerichtet werden und als Gleichstrom in den äußeren Stromkreis fließen. Verbindet man zwei, einander gegenüberliegende Punkte der Wicklung mit zwei isolierten Schleifringen und führt von diesen den induzierten Strom fort, dann bekommt man einen gewöhnlichen einphasigen Strom. Will man aber noch einen anderen Wechselstrom haben, welcher zum ersten in der Phase um eine Viertelperiode verschoben ist, dann muß man naturgemäß noch zwei andere Punkte mit Schleifringen verbinden, zwischen welchen die elektromotorische Kraft dann Null ist, wenn

zwischen den ersten Maximum und umgekehrt. Bei einer zweipoligen Maschine liegen diese vier Abzweigpunkte um je 90° verschoben gegeneinander; eine diesbezügliche schematische Zeichnung für eine Ringarmatur ist in Fig. 16 abgebildet.

Die Wicklung des Ringes hat an vier symmetrisch gelegenen Punkten Abzweigungen. Jede Abzweigung führt zu einem isolierten Schleifring, so daß vier Schleifringe vorhanden sind, welche den Ausgangspunkt des zweiphasigen Stromkreises bilden. Je zwei Abzweigpunkte, also *a*, *b* und *c*, *d* gehören zu einer Phase. Nachdem die Ebenen dieser Abzweigungen aufeinander senkrecht stehen und die Maschine zweipolig ist, werden zwischen *a b* und *c d* solche elektromotorische Kräfte auftreten, deren Phasendifferenz eine Viertelperiode beträgt.

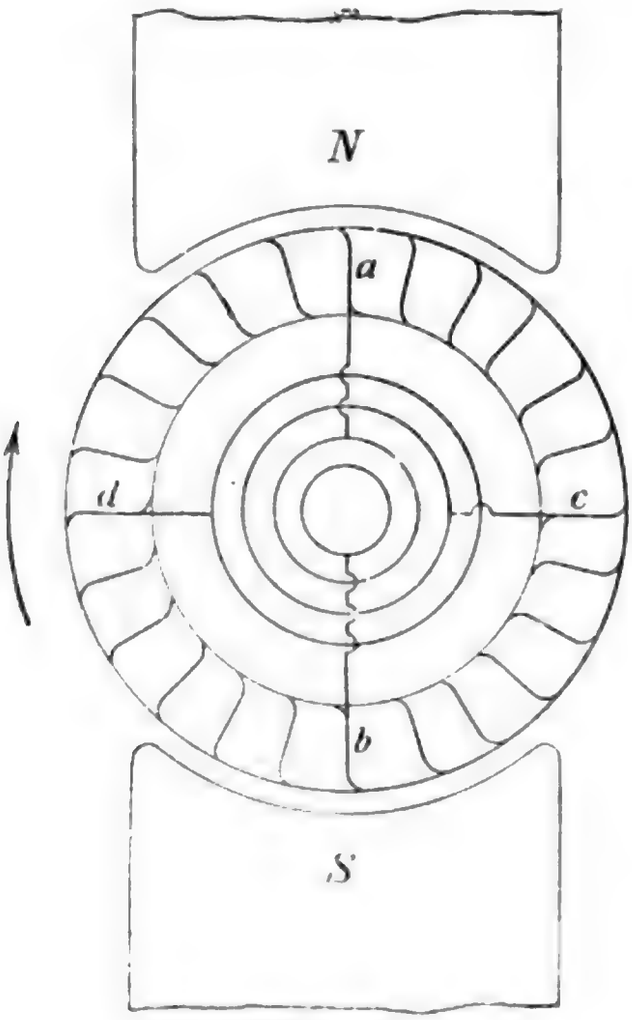


Fig. 16.

Bei mehrpoligen Maschinen müssen die Abzweigungen so gewählt werden, daß, wenn die erste Abzweigung in die Magnetpolachse fällt, die zweite gerade in die Mitte zwischen benachbarten Magnetpolen zu liegen kommt, denn nur in diesem Falle ist die Bedingung erfüllt, daß zwischen den entstehenden zwei Wechselströmen die Phasendifferenz eine Viertelperiode ist.

Man sieht hieraus, daß zeitlich gegeneinander verschobene Wechselströme nach mehreren Methoden hergestellt werden können, und zwar benutzt man entweder Stromerzeuger mit selbstständigen Stromkreisen oder stellt man aus einem einphasigen Wechselstrom durch einen Kunstgriff zwei phasenverschobene Ströme her. Diese letztere Methode wird Kunstphase genannt.

Kunstphase stellte schon Ferraris her, indem er den primären und den sekundären Strom eines Transformators für seine Experimente benutzte.

Zipernowsky und Déri erreichten dieses Ziel dadurch, daß sie einen Teil des erzeugten einphasigen Stromes in die Hauptleitung schickten, den anderen Teil aber in einen Transformator leiteten, dessen sekundärer Strom in der Hauptleitung den zweiten zeitlich verschobenen Strom bildete. Diese Schaltungen haben wir im vorhergehenden ausführlich behandelt.

Bláthy schaltete in den Wechselstromkreis Kondensatoren und Induktionswiderstände, wodurch er phasenverschobene Ströme herstellte.

Dasselbe Resultat erhielten Hutin und Leblanc, indem sie nur Kondensatoren anwendeten.

Während zwischen dem primären und sekundären Strome eines Transformators die Phasenverschiebung immer größer als 90^0 ist, wird bei jener Schaltung von Ferraris, bei welcher der einphasige Strom geteilt und der eine Teil durch einen möglichst induktionslosen Ohmschen Widerstand, der andere dagegen durch einen möglichst großen induktiven Widerstand geleitet wird, die Phasendifferenz stets kleiner als 90^0 sein. Je größer der induktive Widerstand, um so näher kommt der Wert des Phasenverschiebungswinkels zu 90^0, erreicht diesen Wert aber nie.

Alle phasenverschobene Ströme haben die Fähigkeit, ein magnetisches Drehfeld zu erzeugen,

und gerade diese Eigenschaft hat unter kurzer Zeit die mehrphasigen Ströme zu einer Bedeutung gebracht, welche schon am Anfange ihrer Entwicklung darauf schließen ließ, daß viele wichtige Probleme, wie z. B. das der Arbeitsübertragung auf große Entfernungen, die elektrische Traktion etc., welche mit Gleichstrom wirtschaftlich nicht zu lösen waren, in solcher Weise nur mit mehrphasigen Strömen ausführbar sind.

Praktisch völlig befriedigende Resultate hat man mit dem dreiphasigen Wechselstrom erreicht. In der Ausbildung und der Entwicklung dieses Stromsystems hat sich v. Dobrowolsky große Verdienste erworben. Mit der ausführlichen Schilderung und Untersuchung dieses sowie anderer Stromsysteme werden wir uns in den folgenden Kapiteln befassen, behandeln wir aber vor allem den zweiphasigen Wechselstrom.

II. Kapitel.

Der zweiphasige Wechselstrom.

Im vorhergehenden Kapitel haben wir die mehrphasigen Ströme im allgemeinen behandelt, nun wollen wir uns mit einem speziellen Fall dieser Wechselströme befassen, nämlich mit dem zweiphasigen Wechselstrom.

Der zweiphasige Wechselstrom besteht aus zwei Wechselströmen, die gegeneinander zeitlich um eine Viertelperiode verschoben sind und die zusammen ein Stromsystem bilden. Wir haben schon im ersten Kapitel von phasenverschobenen Strömen gesprochen, unter zweiphasigem Wechselstrom aber werden wir nur jene zwei Wechselströme verstehen, welche die oben angegebenen Bedingungen erfüllen.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, daß bei sinusoidaler Veränderung der zweiphasige Wechselstrom durch zwei Sinuskurven dargestellt werden kann, bei welchen der Nullpunkt des einen Stromes mit dem Maximalwert des zweiten zusammenfällt und umgekehrt (Fig. 17). Die zwei Kurven sind mit *I* und *II* bezeichnet, ihr Phasenunterschied ist 90^0.

Wollen wir diese Verhältnisse mit Hilfe eines Vektordiagrammes darstellen, dann verfahren wir in folgender Weise.

Im Zeitpunkte *A* ist $I = 0$ und $II = max.$

Bis zum Zeitpunkte *B* wächst *I* bis zu seinem positiven Maximalwert, *II* nimmt dagegen von dem negativen Maximalwert stetig ab und erreicht in demselben Zeitpunkte den Nullwert, als *I* positives Maximum wird. In dieser Viertelperiode ist also *I* positiv, *II* dagegen negativ. Die Phasenverschiebung ist 90^0, folglich müssen die Vektoren rechtwinkelig zueinander stehen und die Rotationsrichtung muß so gewählt werden, daß die Momentwerte in jedem Zeitpunkte, d. h. die Projektionen der Vektorgrößen auf die Ordinatenachse in jeder

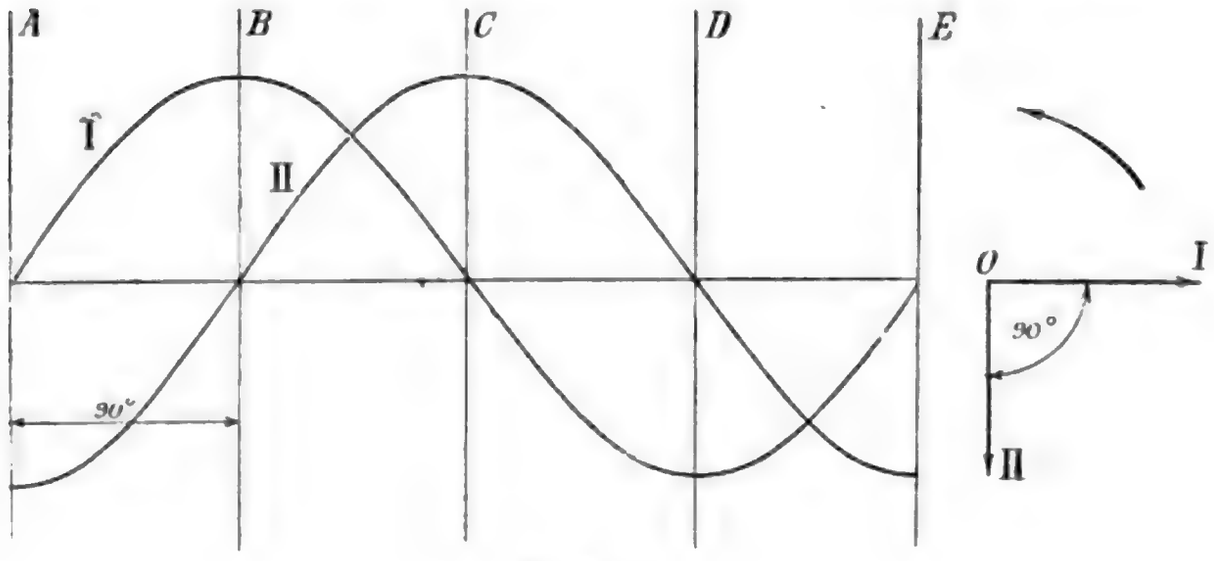


Fig. 17.

Lage solche Vorzeichen besitzen, welche den Momentwerten im Wellendiagramm für den fraglichen Zeitpunkt entsprechen. Wir gehen bei der Konstruktion des Vektordiagrammes vom Zeitpunkte *A* aus, wo *I* Null und *II* negativ Maximum ist, wo also der Vektor *OI* in der Abscissenachse und *OII* in der negativen Hälfte der Ordinatenachse liegt. Die Rotationsrichtung ist die durch den Pfeil angegebene und tatsächlich sehen wir, daß bei dieser Rotationsrichtung die Projektionen des Vektors *OI* während der ersten Viertelperiode bis zum positiven Maximum zunehmen, dagegen jene von *OII* vom negativen Maximum bis Null abnehmen,

Digitized by Google

gerade so, wie während der ersten Viertelperiode im Wellendiagramm.

Die Verhältnisse für die anderen Teile der ganzen Periode decken sich in den zwei graphischen Darstellungsweisen völlig miteinander, die Vergleichung beider bleibt dieselbe, weshalb wir uns mit derselben nicht weiter befassen.

Was die Längen der beiden Vektore betrifft, sind diese einander gleich, da beide Wechselströme

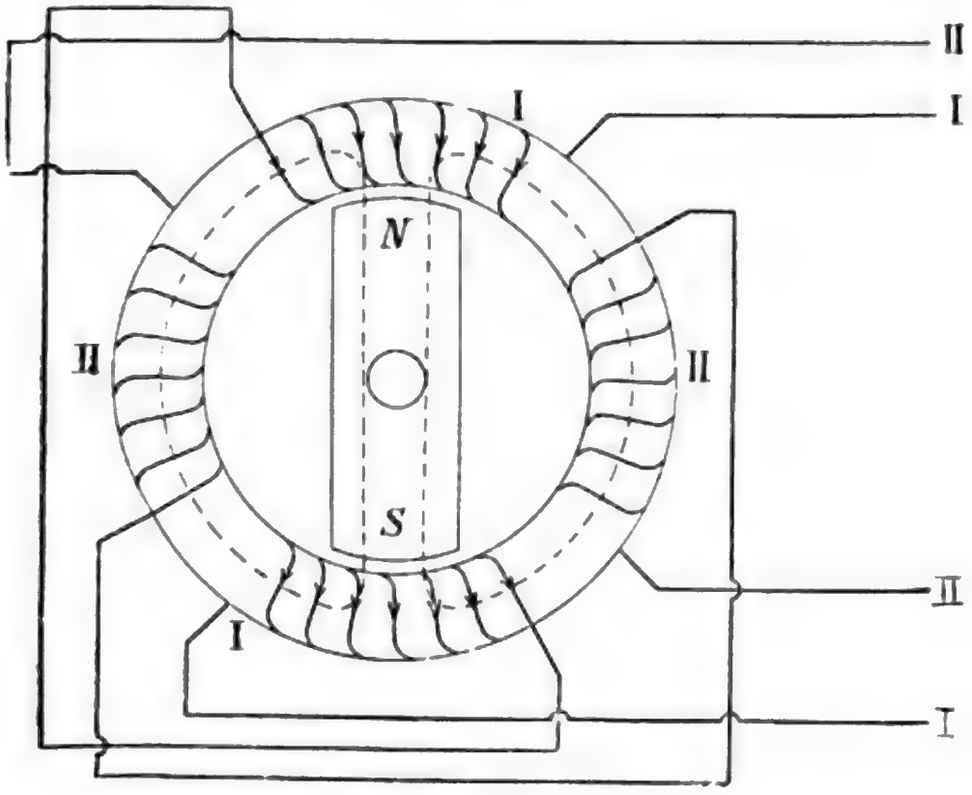


Fig. 18.

dieselben Amplituden, oder mit anderen Worten, dieselben Maximalwerte haben.

Wie wird der zweiphasige Wechselstrom erzeugt? Zwei diesbezügliche Konstruktionsprinzipe haben wir bereits in den Fig. 15 und 16 dargestellt, doch wollen wir nachstehend noch ein Konstruktionsprinzip beschreiben, welches bei den modernen Wechselstrommaschinen stets angewendet wird.

Dies ist in Fig. 18 schematisch dargestellt. *A* ist ein feststehender Eisenring, welcher mit vier

Windungsgruppen versehen ist. Von diesen stehen je zwei diametral einander gegenüber und diese sind miteinander in der angegebenen Weise verbunden. Je zwei Spulengruppen gehören zu einer Phase, und zwar sind die zusammengehörigen Stromkreise mit derselben Zahl versehen.

In dem durch den Ring umschlossenen Raume rotiert ein permanenter oder ein Elektromagnet mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. In der eingezeichneten Stellung stehen die Pole *N* und *S* der Spulengruppe *I* gegenüber und nachdem in dieser Lage die Veränderung der durch die Windungen umschlossenen Kraftlinienzahl eine maximale ist, wird in den Spulen *I, I* eine maximale elektromotorische Kraft induziert.

Im selben Zeitpunkte ist die Veränderung der Kraftlinienzahl in dem durch die Spulen *II, II* umschlossenen Eisenquerschnitt Null und infolge dessen wird in diesen Spulen keine elektromotorische Kraft induziert.

Nach einer Umdrehung des Magneten mit 90° sind die Verhältnisse gerade entgegengesetzt. in *I, I* ist die induzierte elektromotorische Kraft Null. in *II, II* dagegen maximal. Nach weiterer 90° Drehung sind die Induktionsverhältnisse dieselben wie im ersten Falle, mit dem Unterschiede, daß jetzt das Vorzeichen der elektromotorischen Kraft jener im ersten Zeitpunkte entgegengesetzt ist. Dasselbe besteht nach dreiviertel Drehung zwischen den induzierten elektromotorischen Kräften in der zweiten Spulengruppe in bezug auf die erste Vierteldrehung des Magnets. Nach einer vollen Umdrehung sind die Verhältnisse dieselben wie am Anfange und die Induktionserscheinungen wiederholen sich.

Der Verlauf der Kraftlinien ist in der Figur punktiert gezeichnet.

Für die Fortleitung des entstehenden Wechselstromes sind in der Figur vier Leitungen (*I, I* und

II, II) angenommen. Man kann aber zwei dieser Leitungen miteinander verbinden, wobei nur zu beachten ist, daß diese zwei Leitungen zu verschiedenen Phasen gehören müssen, denn würde man zwei zu derselben Phase gehörige Leitungen miteinander verbinden, dann würde man die betreffende Phase in sich selbst kurzschließen.

Bei richtiger Schaltung der Außenleiter sind also drei Hauptleitungen genügend, um den zweiphasigen Wechselstrom fortzuführen. In diesem

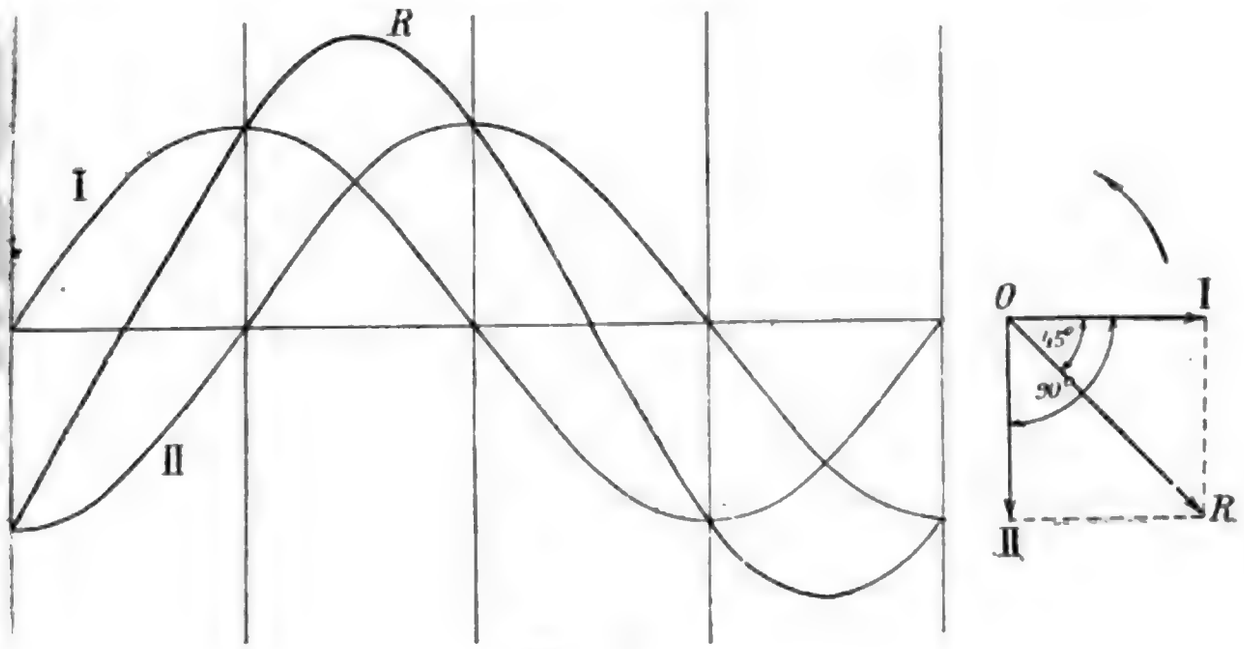


Fig. 19.

Falle führt der gemeinsame Leiter bald die Summe, bald wieder die Differenz der beiden Wechselströme und muß demnach auch entsprechend dimensioniert werden. Welchen Wert der so entstehende resultierende Strom annimmt, ist aus folgenden Konstruktionen ersichtlich (Fig. 19).

Wir wissen, daß die zwei, denselben Leiter durchfließende Ströme zeitlich gegeneinander um eine Viertelperiode verschoben sind, daß also ihre Vektoren zueinander unter 90^0 stehen. Der resultierende Strom setzt sich aus diesen Komponentströmen zusammen und nachdem hier verschiedene

Phasen sind, muß eine geometrische Summation durchgeführt werden. Wie aus dem ersten Teile dieses Werkes bekannt ist, geschieht diese Summation in derselben Weise wie bei den Kräften, d. h. man bildet aus den Komponentströmen ein Vektorpolygon, die Schlußseite ergibt alsdann den gesuchten resultierenden Strom.

Seien in Fig. 19 die Teilströme durch die Vektoren OI und OII dargestellt. Nach den bisherigen Ausführungen ist der Vektor des resultierenden Stromes die Diagonale OR des Quadrates $OIRII$. Wären die Teilströme verschieden groß, d. h. wären die Amplituden der zwei Wechselströme verschieden, dann würde das Quadrat ein Parallelogramm ersetzen.

Der resultierende Strom ist zum Strome OI phasenverspätet, dagegen zu OII phasenverfrüht, und zwar ist der Phasenverschiebungswinkel in beiden Fällen derselbe, nämlich 45^0, da OI und OII gleich groß sind und miteinander 90^0 einschließen.

Die resultierende Kurve läßt sich im Wellendiagramm aus beiden Komponentkurven bestimmen. Für die Momentwerte darf algebraische Summation durchgeführt werden, man bekommt also die einzelnen Punkte der resultierenden Kurve dadurch, daß man die algebraische Summe der zusammengehörigen zwei Momentwerte bildet. Diese Konstruktion durchgeführt, erhält man die Kurve R.

Wir müssen noch untersuchen, in welchem Verhältnisse die Teilströme zum resultierenden Strome stehen.

Aus dem Vektordiagramm ist ersichtlich, daß der Vektor des resultierenden Stromes die Hypothenuse jenes rechtwinkeligen Dreieckes ist, dessen beide Katheten einander gleich, und zwar die Komponentströme sind. Nachdem für ein rechtwinkeliges Dreieck:

Digitized by Google

$$\overline{OR} = \sqrt{\overline{OI}^2 + \overline{OII}^2}$$

ist und in unserem Falle $\overline{OI} = \overline{OII}$, wird

$$\overline{OR} = \sqrt{2 \cdot \overline{OI}^2} = \overline{OI}\sqrt{2} = 1{,}414\,\overline{OI}.$$

$\overline{OI}$ und $\overline{OII}$ sind Vektorgrößen, also Maximalwerte. Derselbe Zusammenhang besteht aber auch für effektive Werte, da

$$i_{eff} = \frac{\overline{OR}}{\sqrt{2}} = 1{,}414\,\frac{\overline{OI}}{\sqrt{2}} = \overline{OI}.$$

Bedeuten OI und OII Stromstärken, dann besagt unsere Gleichung, daß die effektive Stromstärke im gemeinsamen Leiter gleich mit dem Maximalwerte einer der Teilstromstärken ist.

Sehen wir nun, welche Vorteile sind zu erreichen, wenn man anstatt vier Leiter nur deren drei verwendet.

Bezeichnen wir mit i die effektive Stromstärke in den Leitungen in dem Falle, wenn man vier separate Leiter benutzt, und mit i_1 jene effektive Stromstärke, welche in dem gemeinsamen dritten Leiter fließt. Bei unseren Vergleichsrechnungen nehmen wir an, daß die Verluste in beiden Fällen dieselben sind, daß also

$$4\,i^2 r = i_1^2 r_1 + 2\,i^2 r$$

wo r den Ohmschen Widerstand eines Leiters und r_1 jenen des gemeinsamen Leiters bedeutet.

Nachdem aber

$$i_1 = \sqrt{2}\,i$$

wird

$$4\,i^2 r = 2\,i^2 r_1 + 2\,i^2 r$$

d. h.

$$r_1 = r.$$

Digitized by Google

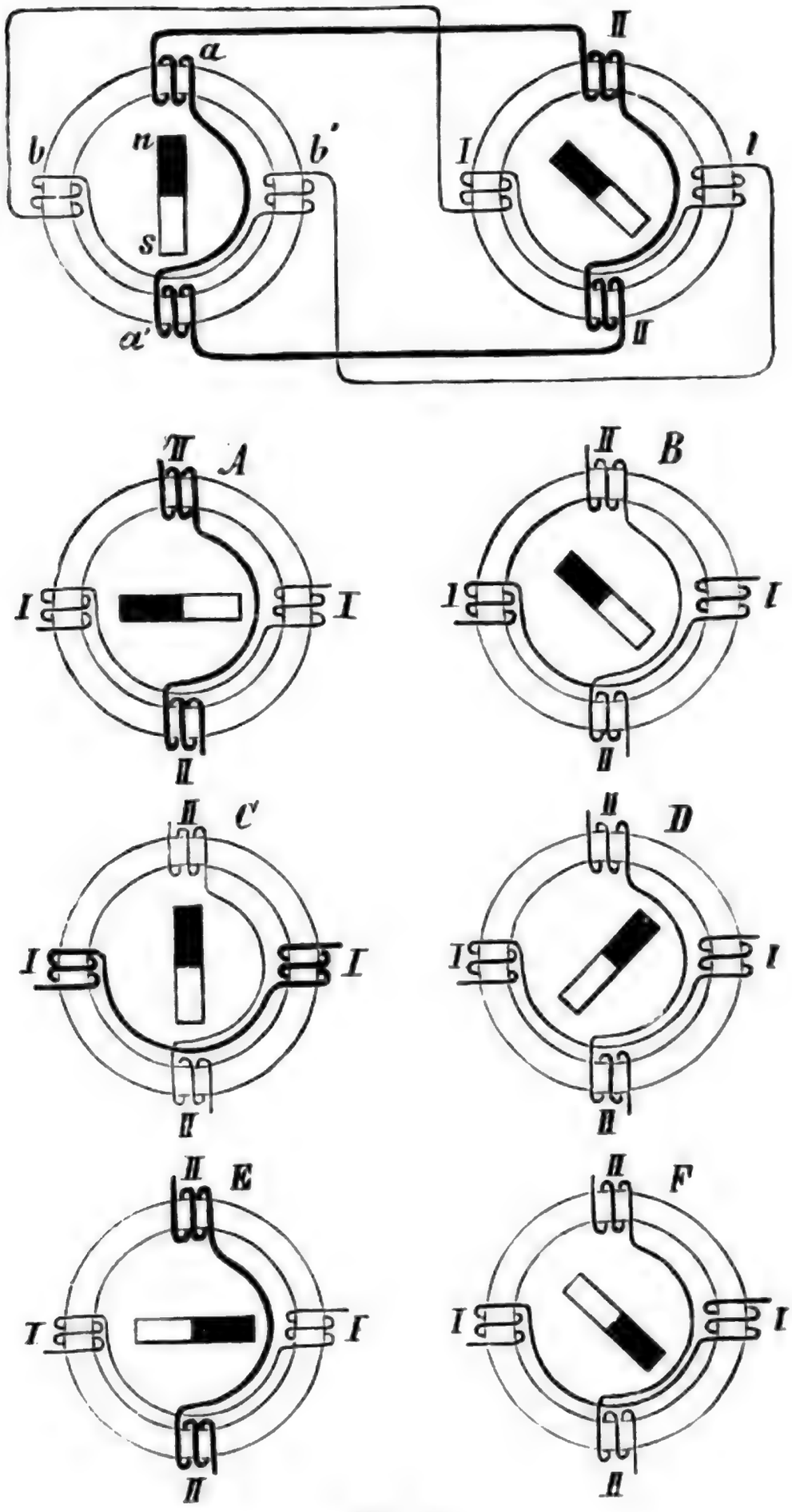

a
b
n
b'
s
a'
II
I
I
II
II A
I
I
II
II B
I
I
II
II C
I
I
II
II D
I
I
II
II E
I
I
II
II F
I
I
II

Fig. 20.

Dies besagt soviel, daß bei gleichen Verlusten trotz der größeren Stromstärke im gemeinsamen Leiter der Querschnitt dieses Leiters nicht größer genommen werden muß. Dieses Resultat ist auch einleuchtend, wenn man nur in Betracht zieht, daß jetzt nur drei Leiter vorhanden sind und somit die Gesamtlänge der Leitung nur der dreiviertel Teil jener Länge ist, welche besteht, wenn vier gesonderte Leiter vorhanden sind.

Nachdem der Querschnitt aller Leiter derselbe ist, ob nun drei oder vier Leitungen den zweiphasigen Strom führen, die Längen aber im ersten und zweiten Falle sich so verhalten, wie 3 : 4, ist leicht einzusehen, daß bei drei Leitungen das benötigte Kupfergewicht um ein Viertelteil kleiner ist als bei vier Leitern, daß also die Ersparnis an Kupfer bei solcher Schaltung 25% beträgt.

Drehfeld bei zweiphasigem Wechselstrom.

Am Schlusse des ersten Kapitels haben wir angedeutet, daß die phasenverschobenen Ströme ein magnetisches Drehfeld erzeugen. Das Wesen eines solchen Drehfeldes geht aus folgenden Ausführungen hervor.

Wir haben z. B. eine zweiphasige Wechselstrommaschine von solcher Konstruktion, wie in Fig. 18 angedeutet. Ein Eisenring ist mit vier Spulen versehen, welche voneinander um je 90° abstehen (Fig. 20). In dem durch diese Armatur umschlossenen Raume bewegt sich der permanente Magnet *n s*. Je zwei einander gegenüberliegende Spulen gehören zu einer Phase und sind untereinander verbunden. *a a'* liefert den einen, *b b'* den zweiten Wechselstrom. Diese Ströme sind gegeneinander zeitlich um eine Viertelperiode verschoben, so daß ihr Wellendiagramm durch die Fig. 21 dargestellt werden kann.

Der zweiphasige Strom wird nun in einen Apparat geleitet, dessen Einrichtung dieselbe ist, als jene der Wechselstrommaschine. Auch hier ist ein in sich geschlossener Eisenring vorhanden, welcher vier, um je 90° versetzte Spulen hat, die miteinander in derselben Weise verbunden sind, als die Spulen des Generators. Der Eisenring schließt ebenfalls einen permanenten Magneten ein, welcher im Mittelpunkte des Ringes drehbar angeordnet ist.

Fließt durch die geeignet geschalteten Windungen ein Gleichstrom, dann entstehen aneinander

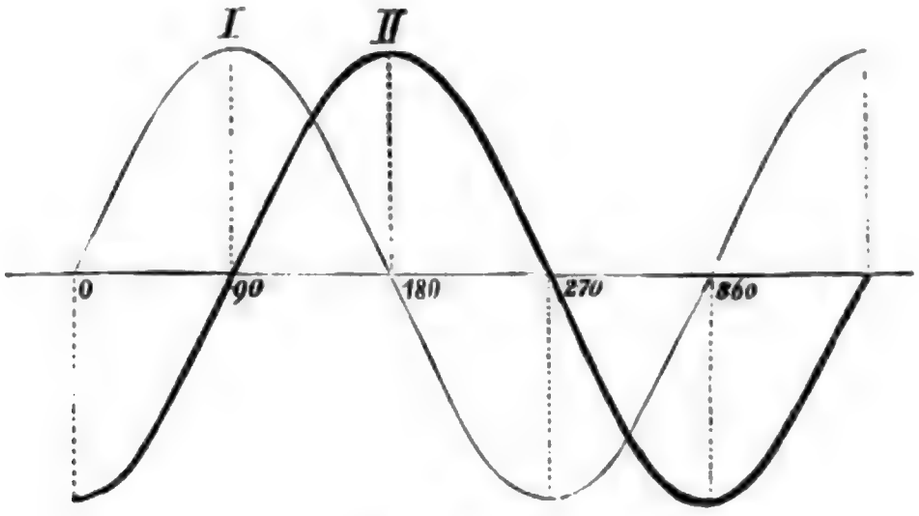


Fig. 21.

gegenüberliegenden Stellen des Ringes freie Magnetpole und der permanente Magnet dreht sich durch die gegenseitige magnetische Abstoßung und Anziehung gerichtet solange, bis sein Nordpol dem Südpole des Ringes und sein Südpol dem Nordpole desselben gegenüber zu stehen kommt. Bei Gleichstrom also bewegt sich der Magnet nur solange, bis er in die oben beschriebene Lage kommt.

Wenn anstatt Gleichstrom einphasiger Wechselstrom durch die Windungen fließt, dann wechseln die Pole des Ringes während einer Periode zwei-

mal und ist der Magnet genug leicht, dann wird er sich schnell hin und her bewegen, d. h. in Vibration kommen. Eine Drehung des Magnetes findet nicht statt.

Anders sind die Verhältnisse, wenn die Spulen durch zweiphasigen Strom durchflossen werden. Wie aus Fig. 21 ersichtlich, haben diese Ströme eine gegenseitige Phasenverschiebung von 90°, dementsprechend ist der eine Strom Null, wenn der andere Maximum und umgekehrt. Jeder Wechselstrom ruft ein magnetisches Feld im Eisenringe hervor, die Stärke dieses Feldes hängt natürlich in jedem Zeitpunkte vom entsprechenden Momentwert des Wechselstromes ab. Wir haben hier also eigentlich mit zwei magnetischen Feldern zu tun, diese addieren sich aber in entsprechender Weise und es entsteht ein resultierendes magnetisches Feld, welches den permanenten Magnet zur kontinuierlichen Drehung veranlaßt.

Der Vorgang der magnetischen Wirkungen ist ebenfalls aus Fig. 20 (von *A* bis *F*) ersichtlich. Der den zweiphasigen Wechselstrom empfangende Apparat ist hier für sechs verschiedene Stromphasen sechsmal aufgezeichnet. In diesen Figuren bedeuten die fettgedruckten Spulen soviel, daß in ihnen der maximale Strom fließt. Sind beide Spulen gleich ausgezogen, dann fließen in beiden Ströme, jedoch hat keiner seinen Maximalwert. Nachdem hier von zweiphasigen Wechselströmen die Rede ist, muß in einer Windung die Stromstärke Null sein, sobald in der anderen ein Maximum auftritt, d. h. in jedem Falle, wo eine Spule fettgedruckt ist, fließt im anderen Spulenpaare kein Strom.

Gehen wir bei unseren Betrachtungen von der Fig. 20 *A* aus. In diesem Zeitmomente ist in *I I* der Strom Null, dagegen in *II II* maximal. Dieser Zeitmoment entspricht dem Anfangspunkte des Wellendiagrammes in Fig. 21.

Der Strom *II* ruft im Eisenringe zwei Magnetpole hervor, welche diametral liegen, und zwar bei den Spulen *II*. War der Magnet in dieser Zeit in einer beliebigen Lage, dann wird er sich solange drehen, bis er den Spulen *II* gegenüber zu stehen kommt.

Die erregenden Wechselströme verändern aber kontinuierlich ihre Intensität, der Strom *I* nähert sich zum positiven Maximum, der Strom *II* dagegen zu seinem Nullwerte und nach einer Achtelperiode sind beide gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet. Diesen Zeitpunkt stellt die Fig. 20 *B* dar.

Sind die Spulen in gleicher Richtung gewickelt und sind ihre Enden mit der Stromquelle so verbunden, daß der Strom *II* einen Nordpol in der linken, der Strom *I* aber einen solchen in der oberen Hälfte des Ringes hervorruft, dann entsteht ein resultierender Nordpol, welcher in die Mittellage des oberen linken Ringquadranten fällt. Der Magnet trachtet dem Nordpol näher zu kommen, er wird deshalb eine Drehung von 45^0 tun und die in Fig. *B* eingezeichnete Lage einnehmen.

Nach einer Viertelperiode haben sich die Stromverhältnisse ganz geändert, und zwar in der Weise, daß nun der Strom *I* maximal und *II* Null ist. Die Folge davon wird sein, daß jetzt nur das dem Strome *I* entsprechende magnetische Feld entsteht, d. h. nur jener Nord- und Südpol wirken, welche in der oberen, beziehungsweise unteren Ringhälfte liegen. Der Magnet bewegt sich also in derselben Richtung um weitere 45^0 und steht nun senkrecht auf seine Anfangsrichtung. Diese Verhältnisse sind in der Fig. 20 *C* dargestellt.

In den weiteren drei Viertelperioden wiederholen sich dieselben Vorgänge, mit dem Unterschiede, daß der resultierende Nordpol von der oberen Ringhälfte nach rechts wandert (Fig. 20 *D*), dann kommt er unter Spule *I* (Fig. 20 *E*) und endlich

Digitized by Google

in die untere rechte Ringhälfte (Fig. 20 *F*) u. s. w. Der permanente Magnet folgt dem resultierenden Felde immer nach und kommt dadurch in Rotation.

Die Rotation des magnetischen Feldes können wir uns folgendermaßen vorstellen:

Wenn auf den Punkt *A* (Fig. 22) zwei zueinander senkrecht stehende Kräfte *I* und *II* wirken, dann bewegt er sich weder in der einen noch in der anderen Richtung, sondern beschreibt einen mit diesen nicht zusammenfallenden Weg. dessen Richtung aus den wirkenden Kräften mit Hilfe einer Parallelogramm-Konstruktion bestimmt werden kann. Nach Verlauf eines gewissen Zeitraumes wird sich der Punkt in jener *R* Lage befinden, welche durch die Diagonale jenes Parallelogrammes bestimmt wird, dessen aufeinander senkrechte Seiten *A I* und *A II* jene Weglängen sind, welche der Punkt zurücklegen würde, wenn auf ihn die genannten Kräfte separat einwirken würden.

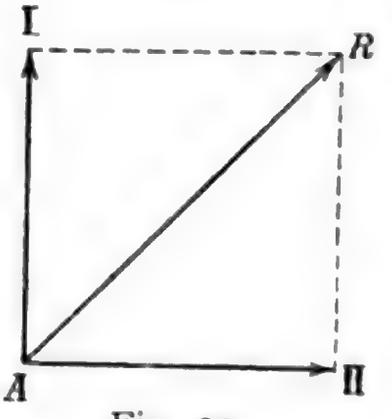


Fig. 22.

Die jeweilige Lage des Punktes *R* hängt also von den wirkenden Kräften ab. Nehmen wir an, daß die wirkenden Kräfte magnetische Kräfte sind, welche auf den Einheitspol wirken und periodisch veränderlich sind. Sind diese Veränderungen nach dem Sinusgesetze verlaufend, dann können diese Kräfte folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$A\,I = X \sin \frac{2\pi}{T} t$$

und

$$A\,II = Y \sin \frac{2\pi}{T} (t + \delta).$$

In diesen Gleichungen bedeuten ebenso wie bei den bereits behandelten periodischen Funk-

Digitized by Google

tionen X und Y die Maximalwerte der periodischen magnetischen Kräfte, T die Zeitdauer einer Periode, t jenen Zeitraum, welcher vom Anfange der Bewegung bis zum fraglichen Zeitpunkte verstrichen ist, und endlich δ jenen Phasenunterschied, welchen die Vektore der Kräfte miteinander einschließen.

Um zwischen AI und AII eine Beziehung bekommen zu können, muß man die Zeit t eliminieren. Wir gelangen dadurch zu einem Ausdrucke, welcher allgemein eine Ellipse darstellt, was soviel besagt, daß der Punkt R in diesem Falle eine Ellipse beschreibt.

Die Form der Ellipse hängt von dem Phasenverschiebungswinkel δ ab. Ist $\delta = 0$ oder 180^0, dann fallen die Richtungen AI und AII in eine Gerade und die elliptische Bahn wird zu einer Geraden, welche durch den Punkt A geht.

Ein anderer spezieller Fall ist der, daß $\delta = 90^0$ oder 270^0 ist. In diesem Falle wird die Ellipse zu einem Kreis, vorausgesetzt natürlich, daß die wirkenden Kräfte gleich groß sind. Der Halbmesser der Kreisbahn ist mit den Maximalwerten der Kräfte gleich, wie dies auch aus unseren Gleichungen hervorgeht:

Ist $\delta = 90^0$, d. h. beträgt die Phasenverschiebung eine Viertelperiode, dann wird:

$$AI = X \sin \frac{2\pi}{T} t$$

und

$$AII = Y \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \left(t + \frac{T}{4}\right)$$

oder aber

$$AII = Y \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Nachdem aber

$$\sin \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) = \cos \frac{2\pi}{T} t$$

ist, wird

$$A\,II = Y\cos\frac{2\pi}{T}t.$$

$A\,I$ und $A\,II$ quadriert und summiert, bekommt man:

$$\overline{A\,I^2} + \overline{A\,II^2} = X^2\sin^2\frac{2\pi}{T}t + Y^2\cos^2\frac{2\pi}{T}t.$$

Wir nahmen aber an, daß beide Kräfte gleich groß sind, daß also $X = Y$ und unter dieser Bedingung wird:

$$\overline{A\,I^2} + \overline{A\,II^2} = X^2\left(\sin^2\frac{2\pi}{T}t + \cos^2\frac{2\pi}{T}t\right)$$

oder

$$\overline{A\,I^2} + \overline{A\,II^2} = X^2$$

da die Summe der Quadrate des Sinus und des Cosinus desselben Winkels gleich Eins ist.

Die letzte Gleichung ist der analytische Ausdruck eines Kreises, dessen Halbmesser X ist und somit haben wir unsere Behauptung bewiesen.

Betrachten wir nun die Verhältnisse bei zweiphasigem Wechselstrom. Wir haben zwei Wechselströme mit der Phasenverschiebung von 90^0 und mit gleichen Maximalwerten. Die magnetische Wirkung eines Stromes oder mit anderen Worten die Intensität des hervorgerufenen magnetischen Feldes hängt außer den Dimensionen der Spulen und des Eisenkernes von der Ampèrewindungszahl ab. Unter dieser Zahl versteht man das Produkt der in Ampère gemessenen Stromstärke mit der gesamten Windungszahl der Spule und bleiben die anderen Dimensionen der Disposition dieselben, dann kann man dieselbe magnetische Feldstärke durch verschiedene Stromstärken und Windungszahlen hervorrufen. Hauptbedingung ist nur, daß das Produkt beider konstant bleibt.

Digitized by Google

In dem gemeinsamen Eisenringe in Fig. 20 wird das resultierende magnetische Feld durch zwei Wechselströme hervorgerufen, man muß deshalb die Summe der jeweiligen Ampèrewindungszahlen bilden, um ein Maß für das resultierende magnetische Feld zu bekommen.

Das magnetische Feld hat die geringste Intensität, wenn der eine Strom Null und der andere Maximum wird. Ein Maximum in der Feldstärke entsteht, wenn die Ampèrewindungszahl maximal wird, d. h. wenn beide Stromstärken ein-

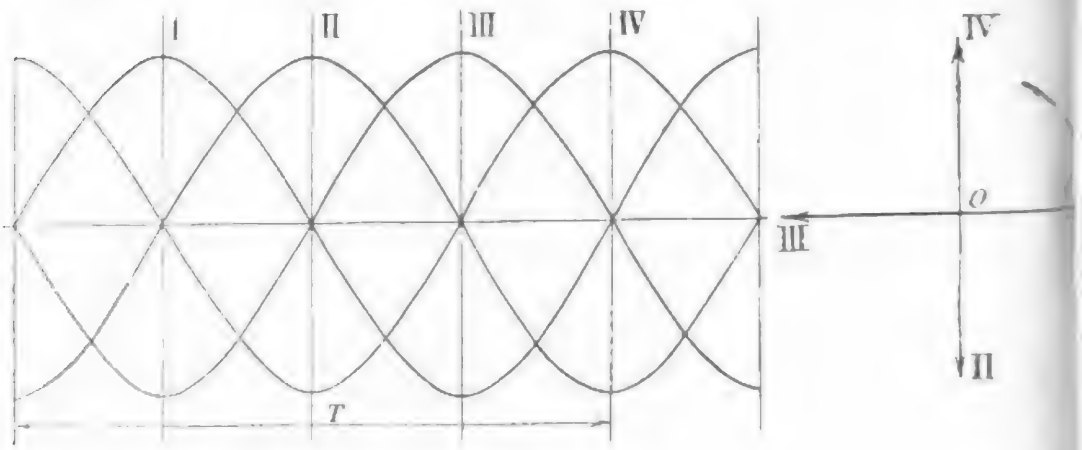


Fig. 23.

ander gleich groß werden. In diesem Zeitpunkte ist der Momentwert des einen Stromes

$$i_1 = J_{max} \sin 45^0 = \frac{J_{max}}{\sqrt{2}}.$$

Um den Gesamtstrom zu bekommen, muß man obige Stromstärke i_1 zweimal nehmen, so daß das magnetische Feld durch die Stromstärke

$$2\, i_1 = i = \frac{2}{\sqrt{2}} J_{max} = 1{,}414\, J_{max}$$

hervorgerufen wird. Nachdem die Windungszahl immer dieselbe bleibt, wird die magnetische Feld-

Google

stärke zwischen 1 und 1,414 variieren, d. h. ihr Minimal- und Maximalwert um 41,4% voneinander verschieden sein. Wir haben also bei Zweiphasenstrom ein pulsierendes magnetisches Feld. Die Pulsation beträgt 41,4% des Mindestwertes des resultierenden Feldes.

Ähnlich dem Zweiphasenstrome sind die Phasenverhältnisse bei vierphasigem Wechselstrom. Der vierphasige Wechselstrom besteht aus vier

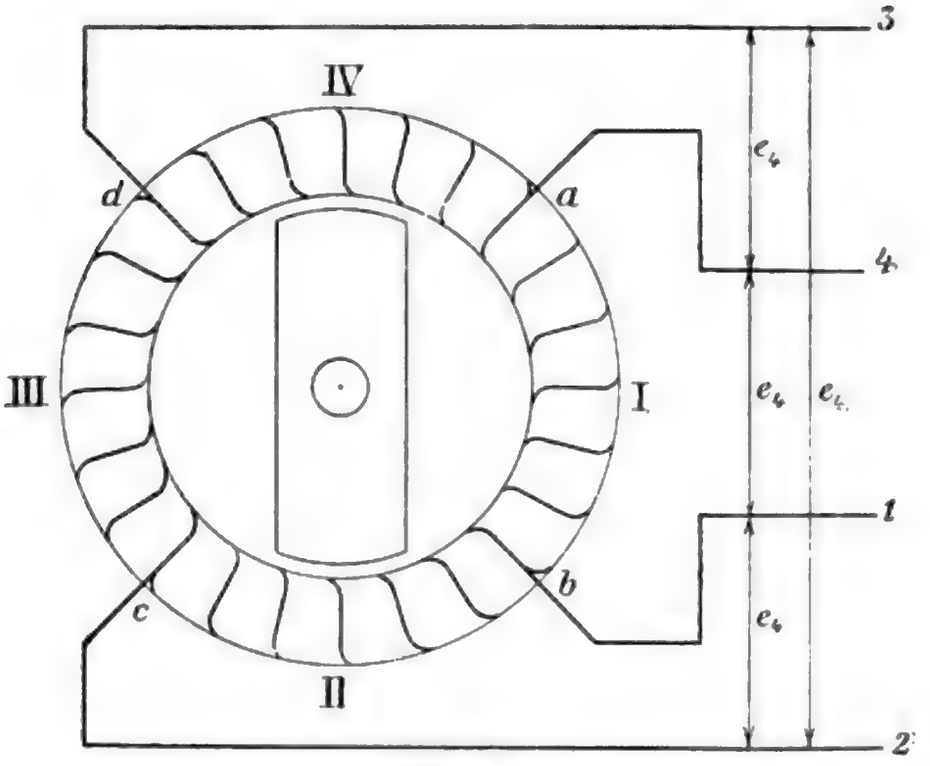


Fig. 24.

Strömen, welche gegeneinander zeitlich um eine Viertelperiode verschoben sind (Fig. 23). Das Vektordiagramm wird demnach aus vier aufeinander senkrechte *OI*, *OII*, *OIII* und *OIV* Vektoren bestehen. Die Drehrichtung ist in diesem Falle der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt, da nur bei dieser Drehrichtung das Vektor- und das Wellendiagramm miteinander übereinstimmen.

Bei Herstellung des Vierphasenstromes hat der Generator ebenso angeordnete vier Spulen,

Digitized by Google

wie in Fig. 18 gezeigt. Die Schaltung ist aber von dieser verschieden.

Die Spulen können entweder parallel oder in Serie miteinander geschaltet werden und dementsprechend unterscheidet man geschlossen verketteten und offen verketteten vierphasigen Wechselstrom.

Bei der Parallelschaltung der Spulen hat der Eisenring eine volle, immer in demselben Sinne

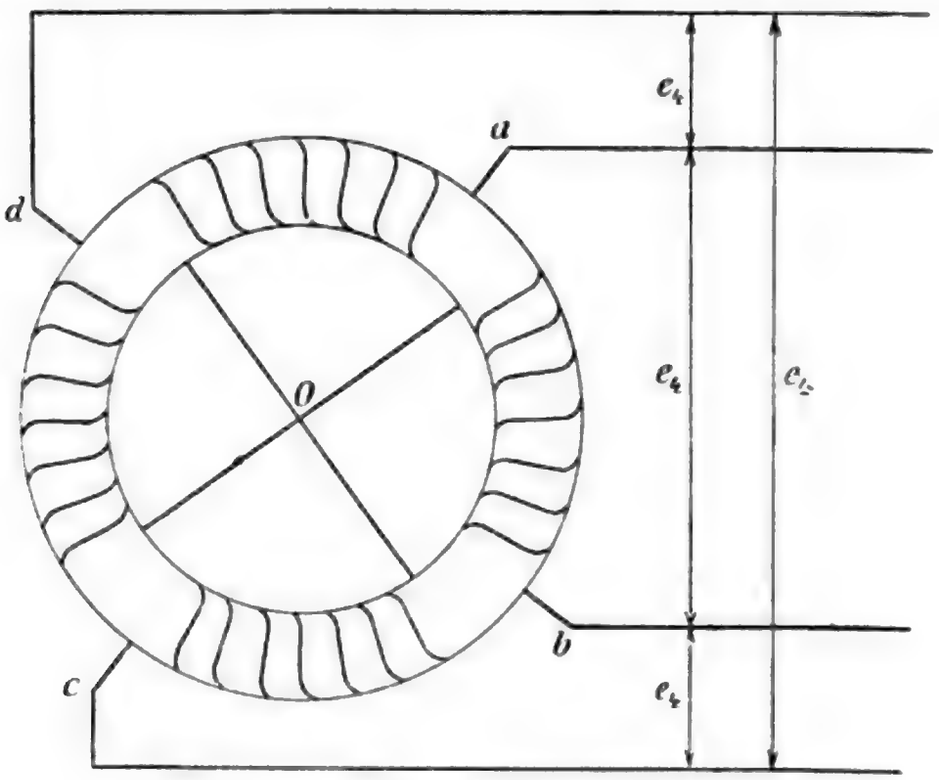


Fig. 25.

verlaufende Wicklung (Fig. 24). An vier symmetrisch liegenden Punkten schließen sich die Außenleiter an, so daß *a*, *b*, *c* und *d* die Pole der Vierphasenmaschine bedeuten. Im Hohlraume des Ringes bewegt sich ein permanenter oder ein Elektromagnet, die Induktionsverhältnisse sind dieselben als bei dem Zweiphasenstrom.

Die Vierphasenspannung tritt zwischen je zwei aufeinander folgenden Außenleitern auf, sie ist überall dieselbe, da in jedem Falle für jede Phase

die Anzahl der induzierten Windungen am Eisenringe dieselbe bleibt

Bei offener Verkettung des Vierphasenstromes oder Serienschaltung desselben ist die Bewicklung des Ringes auf vier gleiche Teile geteilt und die so entstehenden vier Spulen so geschaltet,

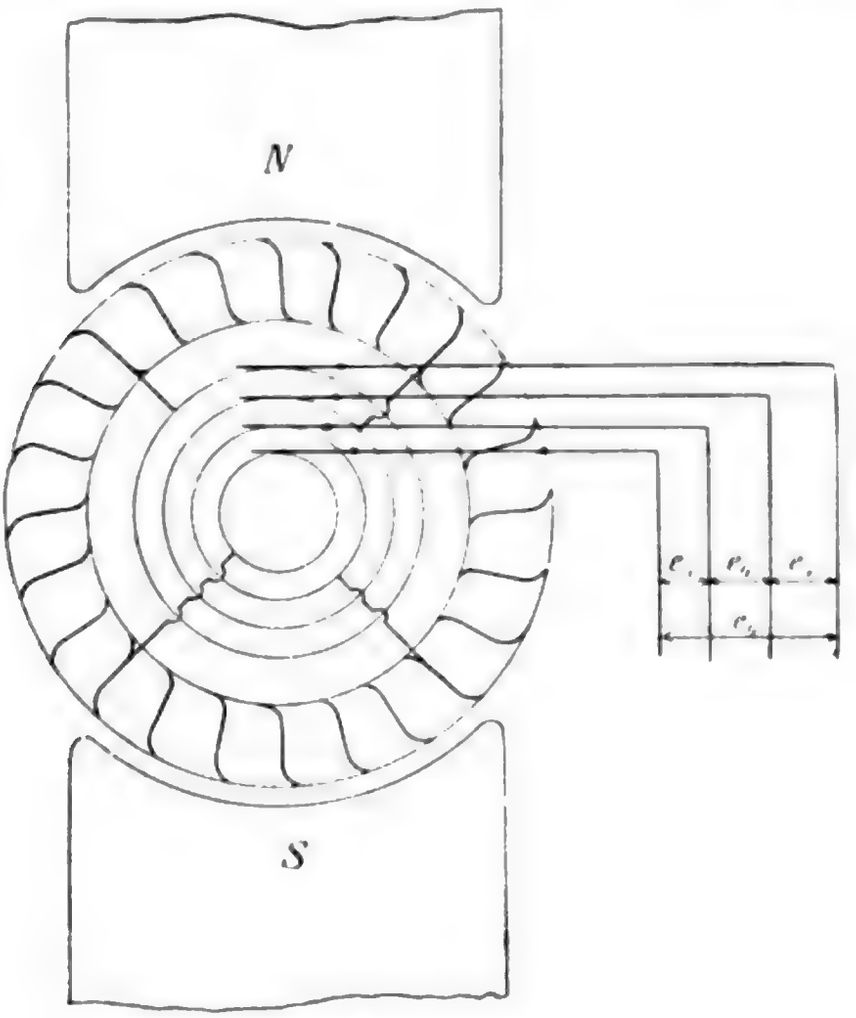


Fig. 26.

daß die Anfangspunkte mit den Außenleitern, die Endpunkte aber untereinander verbunden sind (Fig. 25). Die Pole sind nun *a*, *b*, *c* und *d*, der gemeinsame Punkt *O* wird neutraler Punkt genannt. Die Außenleiter führen zu *a*, *b*, *c* und *d*, zwischen diesen tritt die verkettete Vierphasenspannung auf. Vom neutralen Punkte kann man auch einen Leiter fortführen, sind die Belastungen

aller vier Phasen gleich, dann fließt durch diesen Leiter kein Strom.

Eine gewöhnliche Grammesche Maschine kann auch zur Herstellung von vierphasigem Strom dienen. Bei der Parallelschaltung der Ströme ist die Schaltung der Ringquadranten dieselbe wie in Fig. 24. Die vier gemeinsamen Leiter führen zu

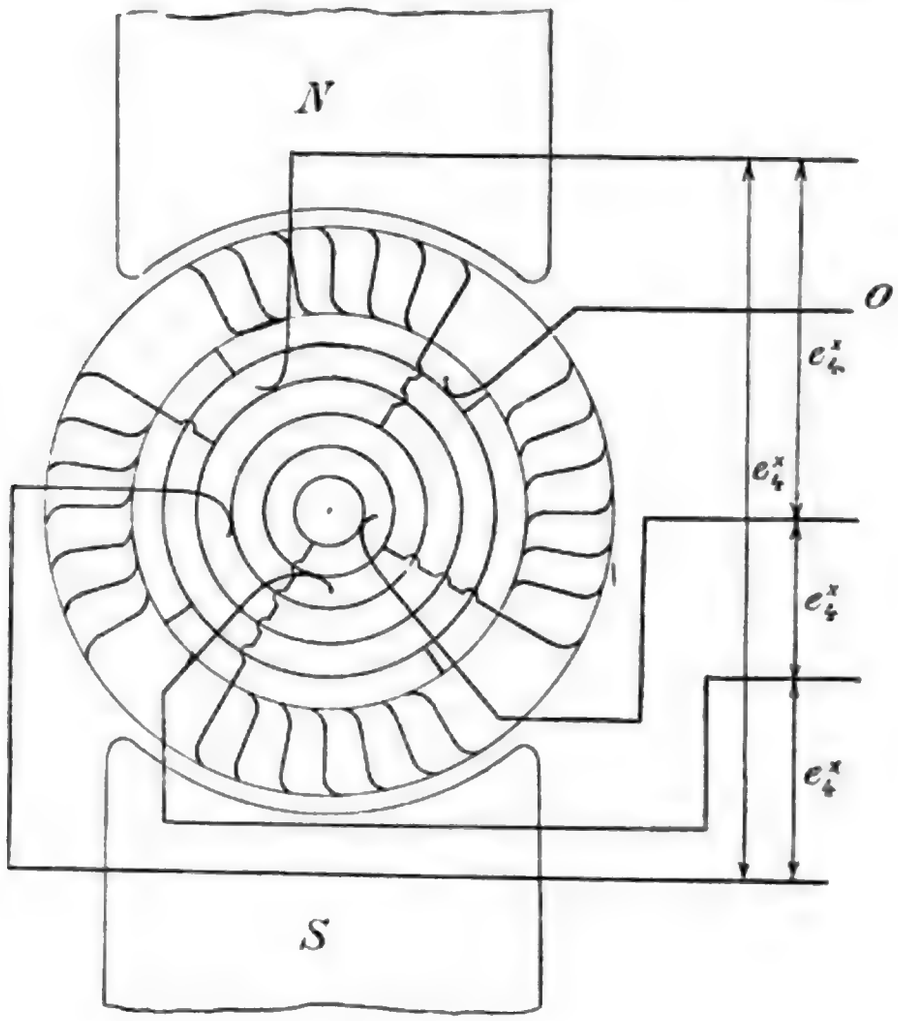


Fig. 27.

vier isolierten Schleifringen, mit denen die Außenleiter in Verbindung stehen (Fig. 26). Die Phasenspannungen treten zwischen aufeinander folgenden Schleifringen auf.

Die offene Verkettung für eine Grammesche Maschine stellt Fig. 27 dar. Die Bewicklung ist auf vier gleiche Teile geteilt, alle Endpunkte zu einem gemeinsamen, die Anfangspunkte aber zu ge-

Digitized by Google

sonderten Schleifringen geführt. In der Figur ist der Ausgleichs- oder neutrale Leiter mit *o* bezeichnet.

Sehen wir nun die Strom- und Spannungswerte der Zwei-, beziehungsweise Vierphasenmaschinen.

Nehmen wir an, daß die eben beschriebene Grammesche Maschine auch mit einem Kollektor versehen ist, um Gleichstrom herstellen zu können. In diesem Falle können die Schleifringe mit den entsprechenden Kollektorsegmenten verbunden werden und nachdem die Wicklung eine symmetrische und gleichmäßige ist, müssen vier voneinander um 90^0 abstehende Segmente mit Schleifringen verbunden werden.

Ist die Maschine im Betriebe, dann entsteht zwischen den Kollektorbürsten eine konstante Potentialdifferenz, deren Größe von der Umdrehungszahl, von der Anzahl der Armaturwindungen, von der Zahl der Polpaare, von der Schaltungsweise der Armatur und der Intensität des magnetischen Feldes abhängt. Da mit Schleifringen Kollektorsegmente verbunden sind, welche im selben Zeitpunkte unter den Gleichstrombürsten liegen (bei Zweiphasenschaltung), beziehungsweise beim Vierphasenstrome ein Schleifring mit dem unter der Gleichstrombürste liegenden Segment, der zur selben Phase gehörende andere Schleifring aber mit einem Segment verbunden ist, welcher zu den Gleichstrombürsten symmetrisch liegt, wird die Zweiphasenspannung mit der Gleichstromspannung gleich, die Vierphasenspannung dagegen je nach der Schaltung verschieden sein.

Die Leistung der Maschine kann naturgemäß bei denselben Verhältnissen nicht geändert werden. Die maximale Leistung bleibt immer dieselbe, ob nun Gleich-, Zwei- oder Vierphasenstrom hergestellt wird. Diese maximale Leistung werden wir unseren Berechnungen zugrunde legen.

Ist die Gleichstromspannung e, die Stromstärke in einer Armaturhälfte $\frac{i}{2}$, dann wird die Leistung der Maschine als Gleichstromgenerator

$$W = 2\, e \frac{i}{2} = e\, i$$

sein. Wird e in Volt, i in Ampère gemessen, dann bekommt man die Leistung in Watt.

Bei Herstellung von Zweiphasenstrom können die Phasen parellel oder in Serie geschaltet werden, ebenso wie bei dem Vierphasenstrom. Der Unterschied ist der, daß während bei Vierphasenstrom je eine Phase durch zwei nacheinander folgende Hauptleitungen begrenzt wurde, bei Zweiphasenstrom, unabhängig davon, ob parallel oder in Serie geschaltet, zu je einer Phase jene Hauptleitungen gehören, welche voneinander gegenüberliegenden Punkten der Armaturwicklung abzweigen.

Behandeln wir diese Fälle in folgender Reihenfolge.

Zweiphasenstrom in Parallelschaltung.

Diese Schaltung ist in Fig. 28 schematisch dargestellt. Der Kreis bedeutet die Armaturwicklung. von welcher in den symmetrisch liegenden vier Punkten a, b, c und d vier Hauptleiter abzweigen. Die Leiter a und c sowie b und d gehören zu einer Phase und es herrscht zwischen diesen die Zweiphasenspannung e_2.

In den Hauptleitungen fließt die effektive Stromstärke i_2. Diese ist die resultierende der Armaturströme i_x, die eine Phasendifferenz von einer Viertelperiode haben. Nachdem aber der zwischen diesen Stromstärken bestehende Zusammenhang durch die bereits behandelte Fig. 22 gegeben ist, wo für vorliegenden Fall

$$A\,I = A\,II = i_x$$

und

$$A\,R = i_2$$

ist, wird

$$i_x = \frac{i_2}{\sqrt{2}}$$

nachdem $A\,II\,R$ ein gleichschenkeliges, rechtwinkeliges Dreieck ist.

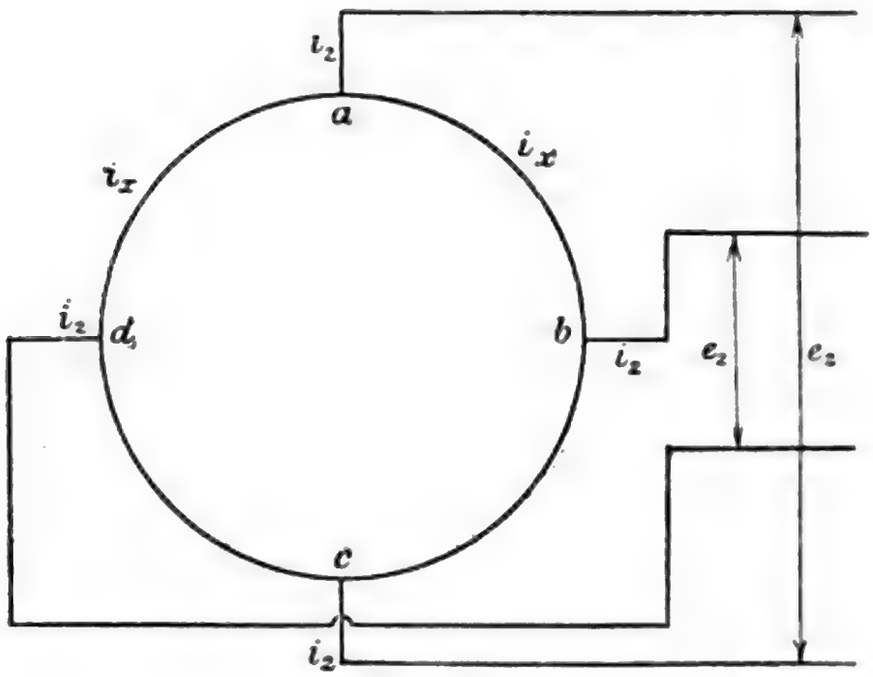


Fig. 28.

Die Gesamtleistung der parallel geschalteten Zweiphasenarmatur wird also

$$W_2 = 2\,i_2\,e_2$$

sein.

Soll diese Leistung mit der Gleichstromleistung gleich sein, dann darf höchstens

$$i_x = \frac{i}{2}$$

sein, denn nur in diesem Falle bleibt die Armaturerwärmung in beiden Fällen dieselbe.

Digitized by Google

Aus beiden Gleichungen für i_x erhält man

$$\frac{i_2}{\sqrt{2}} = \frac{i}{2}$$

oder

$$i_2 = \frac{i}{\sqrt{2}}$$

und

$$W = W_2 = e\,i = 2\,i_2\,e_2$$

oder

$$e\,i = 2\,\frac{i}{\sqrt{2}}\,e_2 = \sqrt{2}\,i\,e_2$$

und hieraus

$$e_2 = \frac{e}{\sqrt{2}} = 0{,}707\,e.$$

Es ist hieraus ersichtlich, daß bei parallel geschalteter Zweiphasenarmatur die Zweiphasenspannung nur 70,7% jenes Spannungswertes beträgt, welche aus derselben Armatur bei gleicher Leistung als Gleichstromspannung herstellbar wäre. Die Zweiphasenstromstärke, ebenfalls gleiche Leistungen vorausgesetzt, ist auch nur der $\frac{1}{\sqrt{2}}$-te Teil der Gleichstromstärke.

Dieser Zusammenhang sowie auch die nachfolgenden haben nur dann Giltigkeit, wenn im Wechselstromkreise zwischen der Stromstärke und der Spannung keine Phasendifferenz ist. Ist aber solche vorhanden, dann ändern sich die Verhältnisse insofern, daß man dann auch noch den Leistungsfaktor in die Leistungsgleichung mit einbeziehen muß.

Zweiphasige Ströme in Serienschaltung.

Dieselbe schematische Darstellungsweise wie bei Fig. 28 benutzend, kann diese Schaltung durch die Fig. 29 dargestellt werden. Die Hauptleitungen *a* und *c*, sowie *b* und *d* gehören zu einer Phase und tritt zwischen ihnen die offen verkettete Zweiphasenspannung auf.

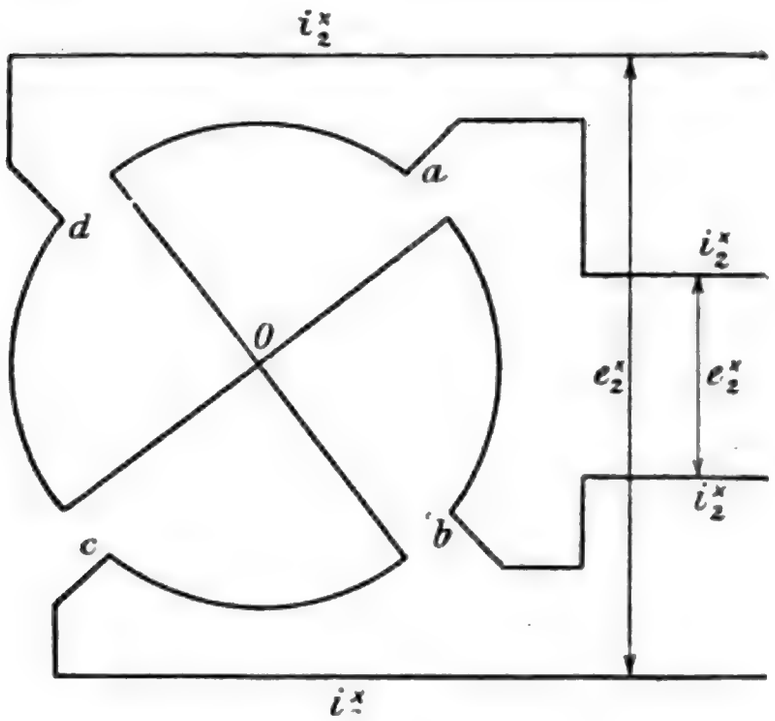


Fig. 29.

Sei diese effektive Spannung e_2^x, die effektive Stromstärke in einer Phase i_2^x. Nachdem jetzt die Armaturteile mit den Außenleitern in Serie geschaltet sind, wird auch in der Armaturwicklung die Stromstärke i_2^x fließen.

Die Gesamtleistung des offen verketteten Zweiphasenstromes ist also

$$W_2^x = 2\, e_2^x\, i_2^x.$$

Und gleiche Leistungen vorausgesetzt:

$$e\, i = 2\, e_2^x\, i_2^x.$$

Die Erwärmung der Armatur ist dieselbe, wenn

$$i_2^{\times} = \frac{i}{2}$$

weshalb

$$e\,i = 2\,e_2^{\times}\frac{i}{2}$$

und

$$e_2^{\times} = e.$$

Bei offen verkettetem Zweiphasenstrom ist also die effektive Phasenspannung mit der Gleichstromspannung gleich. Hierbei ist gleichgiltig, ob die Leiter in *o* untereinander verbunden sind oder nicht. Dieser Punkt kann auch mit einem Außenleiter verbunden werden, in welchem Falle dann zwischen diesem und einem beliebigen Hauptleiter die Potentialdifferenz

$$\frac{e}{2} = \frac{e^{\times}_2}{2} = e_o$$

herrscht, da die Spannung $e^{\times}_2$ aus in diametral gegeneinander liegenden Armaturteilen induzierten elektromotorischen Kräften resultiert, welche eine Phasendifferenz von 180^0 haben und demnach algebraisch summiert werden können, außerdem sind die Windungszahlen in allen vier Armaturteilen dieselben.

Wir können nun auf die Vierphasenarmatur übergehen.

Bei Vierphasenströmen kann auch von geschlossener und offener Verkettung die Rede sein, und dementsprechend sind die Strom- und Spannungsverhältnisse verschieden.

Sei bei parallel geschalteter Armatur die effektive Vierphasenspannung e_4 die effektive Stromstärke in den Außenleitern i_4. In einem

Armaturviertel wird die Stromstärke i_x fließen, deren Größe analog beim Zweiphasenstrome

$$i_x = \frac{i_4}{\sqrt{2}}$$

ist. Nachdem in einem Viertel der Armatur die elektrische Leistung $e_4 i_x$ ist, wird die Gesamtleistung

$$W_4 = 4 e_4 i_x$$

sein. Dies ist mit der Gleichstromleistung gleich zu setzen, also

$$e i = 4 e_4 i_x.$$

i_x kann höchstens $\frac{i}{2}$ sein, damit die Armaturerwärmung dieselbe bleibe, somit wird

$$e i = 4 e_4 \frac{i}{2}$$

oder

$$e_4 = \frac{e}{2}$$

d. h. die effektive Vierphasenspannung ist bei geschlossener Verkettung die Hälfte der Gleichstromspannung.

Vierphasenströme in offener Verkettung.

Wir wissen aus den bisherigen Erörterungen, daß zwischen den Endpunkten der Viertel-Armaturwicklung die Spannungsdifferenz $e_o = \frac{e}{2} = e_4$ auftritt. Bei Serienschaltung fließt dieselbe Stromstärke in den Armaturwindungen wie in den Außenleitern, also im vorliegenden Falle $i_4^{\times}$. Die Leistung in einem Armaturviertel ist $e_4 i_4^{\times}$ folglich

Digitized by Google

die Gesamtleistung der offen verketteten vierphasigen Armatur

$$W_4^{\times} = 4\, e_4\, i_4^{\times}.$$

Bei dieser Schaltung ergibt sich die Phasenspannung $e_4^{\times}$ als die Resultante zweier e_4 Spannungen, welche eine Phasendifferenz von 90^0 haben, also als die Hypothenuse jenes gleichschenkeligen, rechtwinkeligen Dreieckes, dessen beide Katheten e_4 sind. Dies ist aber, wie bekannt, nichts anderes als

$$e_4^{\times} = \sqrt{2}\, e_4$$

oder nachdem

$$e_4 = \frac{e}{2}$$

ist, wird:

$$e_4^{\times} = \sqrt{2}\,\frac{e}{2} = \frac{e}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, e$$

sein.

Die offen verkettete Vierphasenspannung ist also mit der geschlossen verketteten Zweiphasenspannung gleich.

Die entsprechende Vierphasenstromstärke läßt sich nun auch bestimmen, und zwar laut der Leistungsgleichung:

$$e\, i = 4\, e_4\, i_4^{\times}.$$

Da aber

$$e_4 = \frac{e}{2}$$

ist

$$e\, i = 4\,\frac{e}{2}\, i_4^{\times}$$

und hieraus die zulässige maximale Stromstärke in der Armatur

$$i_4^{\times} = \frac{i}{2}$$

was auch mit unseren Annahmen übereinstimmt.

Phasenverhältnisse.

Sowohl bei der Parallel- als auch bei der Serienschaltung der eben behandelten Mehrphasenströme hatten wir mit Komponent- und resultierenden Größen zu tun. Diese Größen haben verschiedene Phasen, unsere Aufgabe sei nun, diese Phasenverhältnisse näher zu bestimmen.

Bei parallel geschalteter Zweiphasenarmatur ist die in die Hauptleitungen fließende Stromstärke eine resultierende Größe. Die zwei Komponentstromstärken haben eine Phasendifferenz von 90^0, der resultierende Strom i_2 wird also zu beiden eine gleiche Phasendifferenz haben, nämlich jene von 45^0, und zwar wird dieser Strom in der Phase einer Komponente vor-, der anderen dagegen nacheilen. Diese Verhältnisse können mit Hilfe der Fig. 22 dargestellt werden.

Bei Zweiphasenstrom mit Serienschaltung ist die Stromstärke in den Außenleitern und den Armaturwindungen dieselbe, jedoch ist die Phasenspannung $e_2^{\times}$ (Fig. 29) ein resultierender Wert. Die Komponentspannungen haben jetzt, ebenso wie im ersten Falle die Stromstärken, eine Phasendifferenz von 90^0 und die resultierende Spannung steht zu den Komponentspannungen in demselben Phasenverhältnis als bevor die resultierende Stromstärke.

Beim Vierphasenstrom haben wir mit vier voneinander um je 90^0 in der Phase verschobenen Vektorgrößen zu tun (s. Fig. 23). Die Ströme, welche bei Parallelschaltung durch die Armaturwindungen fließen, sind durch die Vektoren *I*, *II*, *III* und *IV* gegeben. Nachdem diese immer entgegengesetzte Veränderungstendenzen haben, müssen bei der Bestimmung der resultierenden Ströme die Komponentströme mit entgegengesetzten Vorzeichen versehen werden. Nehmen wir die in Fig. 24 dargestellten Verhältnisse an, dann sehen

wir, daß der Strom in der Leitung 1 aus *I* und *II* resultiert und bedeuten dann noch i_I und i_{II} die effektiven Komponentströme, dann wird die für die resultierende Stromstärke giltige Vektorgleichung

$$i_1 = i_I(+) - i_{II}$$

sein, wo $(+)$ bedeutet, daß eine geometrische und keine algebraische Summation vorzunehmen ist.

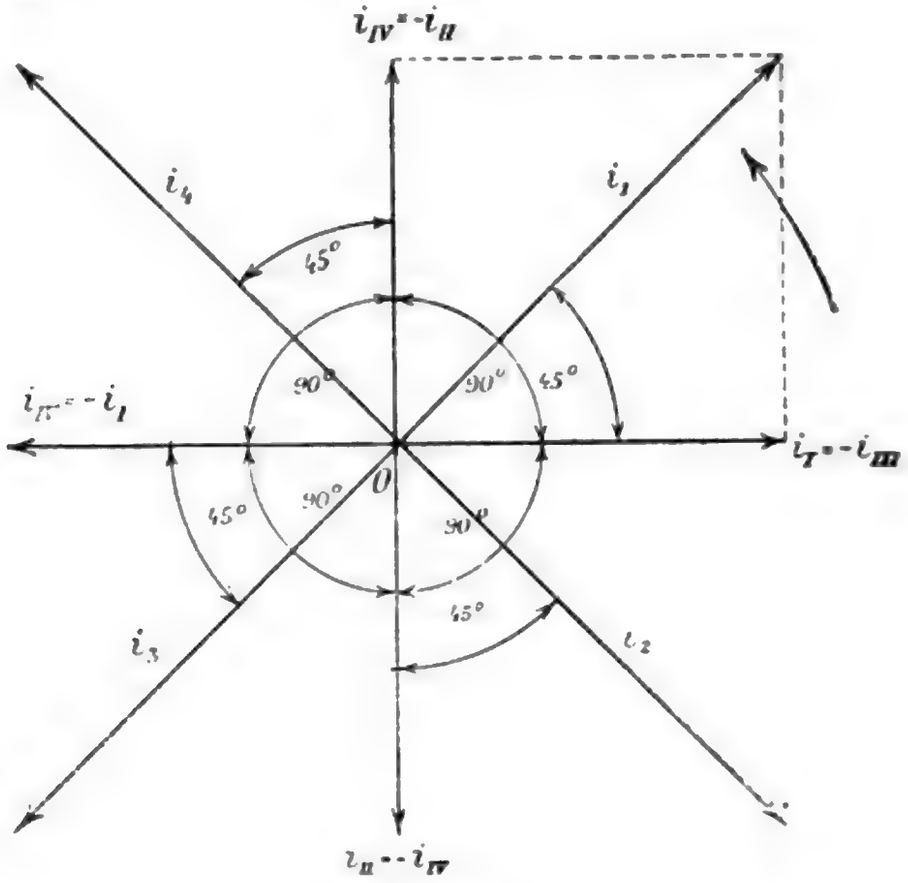


Fig. 30.

Die Konstruktion des resultierenden Stromes ist aus Fig. 30 zu entnehmen.

Nach der letzten Gleichung ist i_1 aus i_I und $-i_{II}$ zu konstruieren. i_{II} ist negativ zu nehmen. der entsprechende Vektor fällt also mit i_{IV} zusammen, so daß

$$i_{IV} = -i_{II}.$$

Die resultierende Stromstärke i_1 ist hierdurch sowohl auf ihre Größe, wie auch auf ihre Lage

Digitized by Google

bestimmt und es ist aus der Figur ersichtlich, daß i_1 zum Strome i_I in der Phase um 45^0 voreilt.

Die Ströme der anderen drei Phasen i_2, i_3 und i_4 lassen sich in derselben Weise bestimmen. Bei der Konstruktion muß man nur in Betracht ziehen, daß

$$i_{II} = -i_{IV}; \quad i_{III} = -i_I \quad \text{und} \quad i_I = -i_{III}$$

ist.

Die Vektoren der Resultantströme i_1, i_2, i_3 und i_4 stehen senkrecht aufeinander, folglich haben sie gegen die entsprechenden Teilströme denselben Phasenvoreilungswinkel von 45^0.

Es wäre noch die Serienschaltung der Vierphasenströme zu besprechen. Nachdem aber dies nichts neues mehr in sich birgt, sondern völlig identisch mit den eben besprochenen ist (der ganze Unterschied besteht in dem, daß an Stelle der Stromstärken jetzt Spannungen zu setzen sind), befassen wir uns mit derselben nicht eingehender.

Digitized by Google

III. Kapitel.

Der dreiphasige Wechselstrom.

Von den mehrphasigen Wechselströmen hat in der Wechselstromtechnik der dreiphasige Wechselstrom oder Drehstrom die größte Bedeutung erlangt. Die Ursache ist hauptsächlich darin zu suchen, daß die Anwendung des Drehstromes und die Durchführbarkeit der elektrischen Arbeitsübertragung mittels Wechselströmen eng miteinander verknüpft sind. Wenn der gewöhnliche oder einphasige Wechselstrom zu Beleuchtungszwecken sehr gut verwendbar und durch einfache Methoden auf große Entfernungen leicht und ökonomisch verteilbar ist, hat er den nicht unerheblichen Fehler, daß er, da Wechselstrommotoren für Einphasenstrom nur unter gewissen Bedingungen arbeitsfähig sind, nur unbequem zur Arbeitsübertragung verwendet werden kann. Erst als die Wirkungsweise der Mehrphasenmotoren bekannt wurde, eröffnete sich für die Arbeitsübertragung mittels Wechselstrom ein weites Feld, und dieses Problem wurde erst dann vollständig gelöst, als der Dreiphasenstrom zur allgemeinen Verwendung gelangte.

Wohl waren schon früher die Mehrphasen-Motoren nach Ferraris, Tesla bekannt; diese erfüllten aber die in sie gesetzten Hoffnungen nicht, denn alle litten an dem gemeinsamen Fehler

Digitized by Google

des stark pulsierenden magnetischen Feldes und hatten demzufolge schlechte Betriebseigenschaften. Mit den Dreiphasenmotoren gelang es dagegen, wirklich brauchbare Wechselstrommotoren zu bauen, welche nicht nur in ihren Betriebseigenschaften tadellos, sondern auch in ihrem Wirkungsgrade vorzüglich sind und so mit den Gleichstrommotoren die Konkurrenz aufnehmen können, vor welchen sie noch den großen Vorteil besitzen, daß bei ihnen das heikelste Maschinenelement elektrischer Maschinen, der Kollektor, gänzlich fehlt und nur bei größeren Motoren massive Schleifringe vorhanden sind.

Die erste praktische Kraftübertragungsanlage mit Drehstrom war die von Lauffen nach Frankfurt a. M. Sie gab Anregung zur weiteren Vervollkommnung dieses Systems und besonders v. Dobrowolsky hatte große Verdienste in der Ausarbeitung und technischen Durchführung des Drehstromes erworben.

Schon Bradley befaßte sich im Jahre 1888 mit dem Problem, aus einem Grammeschen Anker durch geeignete Schaltungen dreiphasigen Wechselstrom herzustellen. In dieselbe Zeit fallen auch die Arbeiten von Haselwander und Dobrowolsky. Hier muß auch Wenström genannt werden, der zwar etwas später ein diesbezügliches Patent einreichte, doch auch zu den ersten Bahnbrechern auf diesem Gebiete gezählt werden muß, denn seine Vorarbeiten fallen auch in jene Zeitperiode, in welcher die obengenannten bereits Patente auf ihre Erfindungen erlangten. Eine Priorität kann hier schwer festgestellt werden, denn die Erfindungen kamen in so rascher Aufeinanderfolge, daß eigentlich allen diesen Erfindern die Priorität zuerkannt werden müßte. In der praktisch vollkommenen Ausbildung und Durchführung des Drehstromprinzipes gehört das Prioritätsrecht entschieden Dolivo v. Dobro-

wolsky, beziehungsweise der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin.

Woraus besteht eigentlich der Drehstrom? Wie schon der Name dreiphasiger Wechselstrom andeutet, haben wir hier mit drei Wechselströmen zu tun, welche zusammen ein Stromsystem bilden. Diese drei Wechselströme werden in einem Erzeuger induziert, sie sind gegeneinander in der Phase um 120° verschoben und besitzen gleiche Amplituden, d. h. gleich große Maximalwerte.

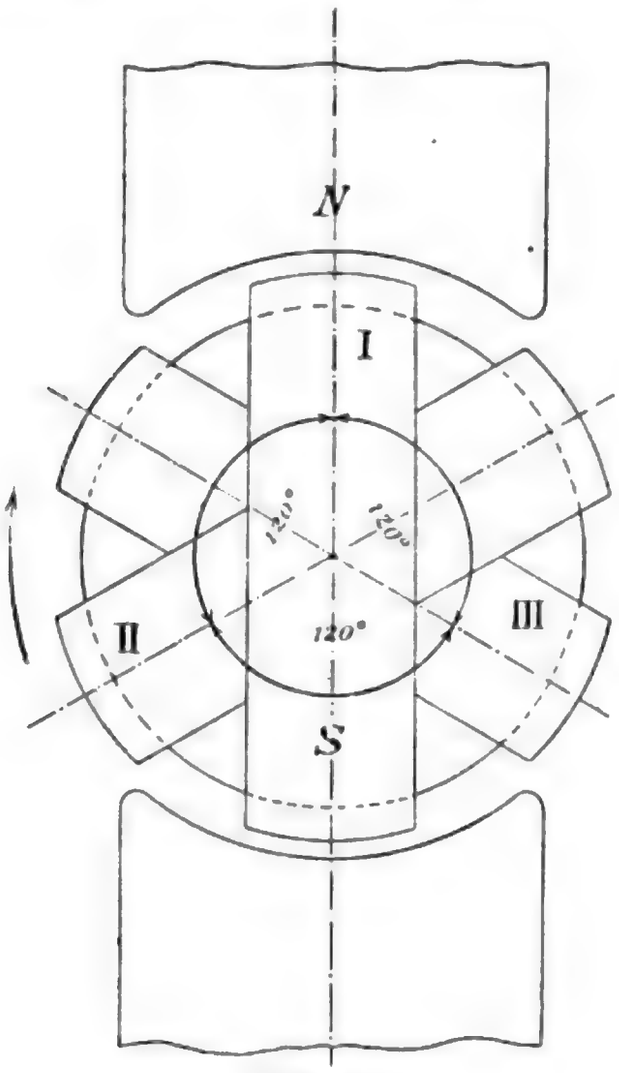


Fig. 31.

Um mit den Induktionsverhältnissen in solchen Maschinen im Reinen zu sein, betrachten wir die Anordnung in Fig. 31, welche eine schematische Darstellung einer Drehstrommaschine ist.

Im Magnetfelde einer zweipoligen Maschine dreht sich ein Eisenkern, welcher mit drei gegeneinander um 120° versetzte Spulen *I, II, III* versehen ist. In jeder Spule werden elektromotorische Kräfte induziert, welche indessen gegeneinander in der Phase zeitlich verschoben sind. Die Phasenverhältnisse werden übersichtlich, wenn wir diese drei Spulen separat berücksichtigen und die induzierte elektromotorische Kraft auf ihre Richtung und Größe untersuchen.

Digitized by Google

Fig. 32 stellt dieselbe Maschine dar, nur sind die Spulen jede für sich allein eingezeichnet, wobei ihre relativen Lagen beibehalten sind.

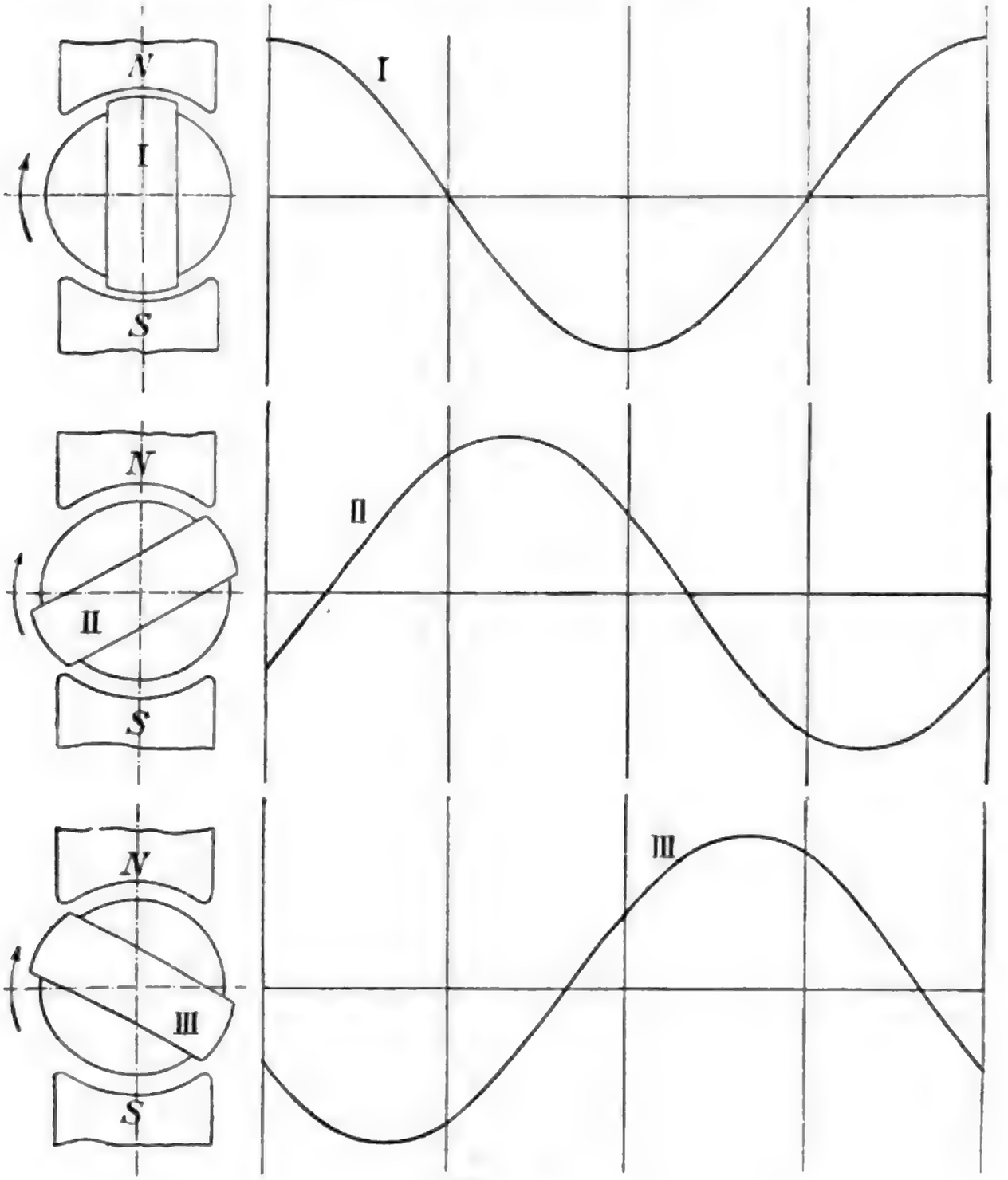


Fig. 32.

Im obersten Teile der Figur ist nur Spule *I* dargestellt. In der eingezeichneten Lage ist die in derselben induzierte elektromotorische Kraft

maximal, und zwar nehmen wir an, sie ist ein positives Maximum. Nach 90° Drehung wird sie Null, nach 180° negativ maximal, dann nach 270° abermals Null, um nach einer vollen Umdrehung der Armatur wieder den ursprünglichen positiven Maximalwert zu erreichen. Während einer Umdrehung vollendete die Veränderung der induzierten elektromotorischen Kraft eine Periode.

Bezeichnen wir mit *o* jenen Zeitpunkt, in welchem die wechselstrom-elektromotorische Kraft *I* ihr positives Maximum erreicht. In diesem Augenblicke ist Spule *II* mit 30° unter der neutralen Achse der Armatur, die in ihr induzierte elektromotorische Kraft wird also nach 30° Drehung oder $\frac{1}{12}$ Periode ihren Nullwert erreichen. Erst nach diesem Zeitpunkte wird sie positive Werte annehmen und nach 120° Drehung, von der Anfangslage aus gerechnet, ihr positives Maximum erreichen, denn die Spule wird nur in diesem Falle die ursprüngliche Lage der Spule *I* einnehmen. Die zweite elektromotorische Kraft *II* ist also nach der ersten *(I)* in der Phase um 120° verschoben, d. h. sie erreicht ihre Nullwerte und die Maximalwerte mit demselben Vorzeichen um $\frac{1}{3}$ Periode später als *I*. Diese Verhältnisse sind im Mittelteile der Fig. 32 durch die Kurve *II* graphisch dargestellt.

Die Spule *III* ist zur Spule *II* um 120° versetzt, zwischen den in diesen Spulen induzierten elektromotorischen Kräften ist der Zusammenhang die Phase betreffend also dieselbe wie zwischen *I* und *II*. Nach 60° Drehung, von der Anfangslage gerechnet, wird die induzierte elektromotorische Kraft negativ Maximum und nach dieser Lage um weitere 180°, also zusammen um 240° Drehung vom Anfangspunkte aus, hat *III* einen

Digitized by Google

positiven Maximalwert, so wie *I* am Beginne der Drehung.

Die Kurven *I, II* und *III* sind demnach gegeneinander in der Phase um je 120° verschoben, alle zusammen in einem System bilden den dreiphasigen Wechselstrom oder Drehstrom. Werden in Fig. 32 die drei Kurven ineinander gezeichnet, dann bekommt man die Fig. 33, welche das Wellendiagramm des Drehstromes ist.

Wir werden zumeist mit Vektordiagrammen arbeiten, es ist daher nötig, auch dieses Diagramm des Drehstromes zu konstruieren.

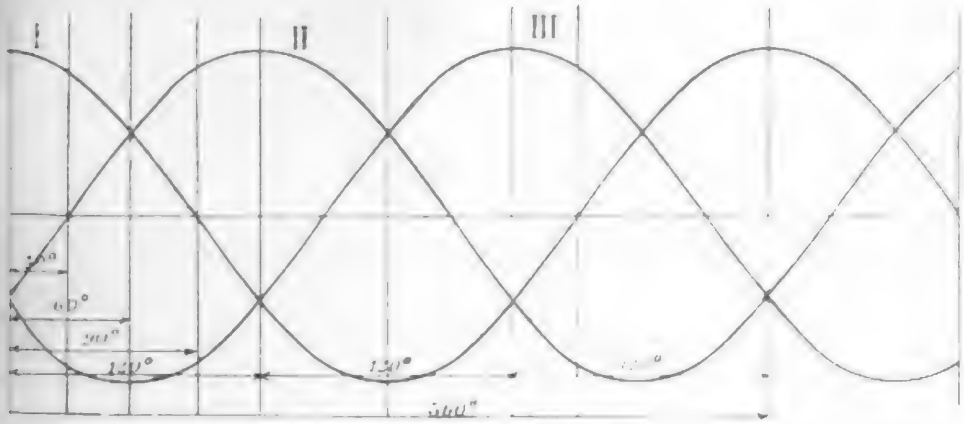


Fig. 33.

Wir wissen, daß beim Drehstrom die elektromotorischen Kräfte oder die Ströme um je 120° in der Phase verschoben sind. Wollen wir daher ein Vektordiagramm für diese Verhältnisse aufstellen, dann müssen wir die entsprechenden Vektoren gegeneinander um $\frac{1}{3}$ Periode oder 120° verschieben. Wir erhalten dadurch die Fig. 34, welche bei der angenommenen Drehrichtung dieselben Resultate ergibt als das Wellendiagramm in Fig. 33.

Die Kurven *I, II* und *III* in Fig. 33 geben in ihrer Gesamtheit ein symmetrisches Ganzes und es

ist von Interesse, jenen Zusammenhang zu kennen. welcher zwischen den Momentwerten der drei Wechselgrößen in einem gegebenen Zeitpunkte besteht.

Sinusveränderungen annehmend, sei der Ausdruck für den Momentwert des *I.*-ten Wechselstromes

$$i_1 = J_1 \sin \omega t.$$

Nachdem *II* und *III* mit 120° beziehungsweise 240° in der Phase hinter *I* verschoben sind, werden für ihre Momentwerte in demselben Zeitpunkt folgende Gleichungen bestehen:

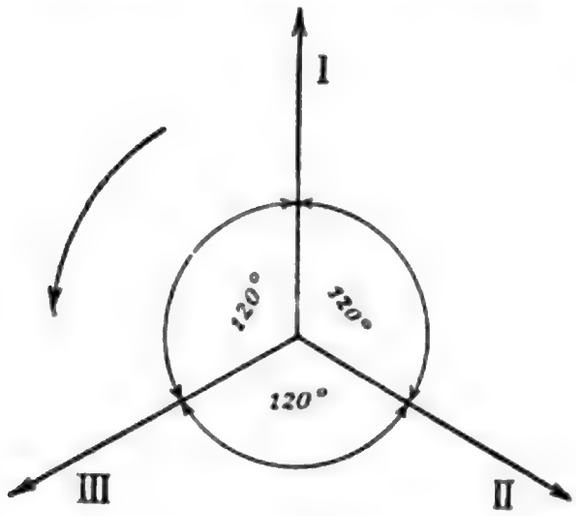


Fig. 34.

$$i_2 = J_2 \sin (\omega t + 120^0)$$

und

$$i_3 = J_3 \sin (\omega t + 240^0).$$

Bei diesen Gleichungen ist vorausgesetzt, daß die Ströme in derselben Reihenfolge fortschreiten als in Fig. 33. Wäre die Reihenfolge eine entgegengesetzte, dann würden i_2 und i_3 in der Phase dem Strome i_1 voreilen und die Gleichungen wären:

$$i_1 = J_1 \sin \omega t$$

$$i_2 = J_2 \sin (\omega t - 120^0)$$

$$i_3 = J_3 \sin (\omega t - 240^0).$$

Bilden wir die Summen im ersten Falle der Ströme i_2 und i_3, dann wird:

$$i_2 + i_3 = J_2 \sin (\omega t + 120^0) + J_3 \sin (\omega t + 240^0)$$
$$= J_2 (\sin \omega t \cos 120^0 + \cos \omega t \sin 120^0) + J_3 (\sin \omega t \cos 240^0 + \cos \omega t \sin 240^0).$$

Digitized by Google

Nachdem aber:

$$\cos 120^0 = -\cos 60^0 = -\frac{1}{2}$$

und

$$\sin 120^0 = \sin 60^0 = \frac{1}{2}\sqrt{3}.$$

Ferner:

$$\cos 240^0 = \cos 120^0 = -\frac{1}{2}$$

$$\sin 240^0 = -\sin 120^0 = -\frac{1}{2}\sqrt{3}$$

wird

$$i_2 + i_3 = J_2\left(-\frac{1}{2}\sin\omega t + \frac{1}{2}\sqrt{3}\cos\omega t\right) + J_3\left(-\frac{1}{2}\sin\omega t - \frac{1}{2}\sqrt{3}\cos\omega t\right).$$

Die drei Ströme haben aber dieselben Maximalwerte, so daß

$$J_1 = J_2 = J_3 = J$$

und demnach

$$i_2 + i_3 = J\left(-\frac{1}{2}\sin\omega t + \frac{1}{2}\sqrt{3}\cos\omega t - \frac{1}{2}\sin\omega t - \frac{1}{2}\sqrt{3}\cos\omega t\right)$$

oder

$$i_2 + i_3 = -J\sin\omega t = -i_1$$

d. h. die Summe zweier Wechselströme ist bei dreiphasigem Strome immer gleich groß und entgegengesetzt dem dritten Strome. Diese letzte Gleichung anders geschrieben, wird

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

oder mit Worten, die algebraische Summe der

Momentwerte des dreiphasigen Wechselstromes ist für jeden Zeitpunkt Null. Dies sagt soviel, daß die Strommenge, welche durch einen Teil der Leitungen vom Generator fortfließt, durch die übriggebliebenen Leitungen wieder zum Generator zurückströmt.

Man kann die in Fig. 18 schematisch dargestellte Anordnung auch zur Herstellung dreiphasigen Wechselstromes benutzen. In diesem Falle

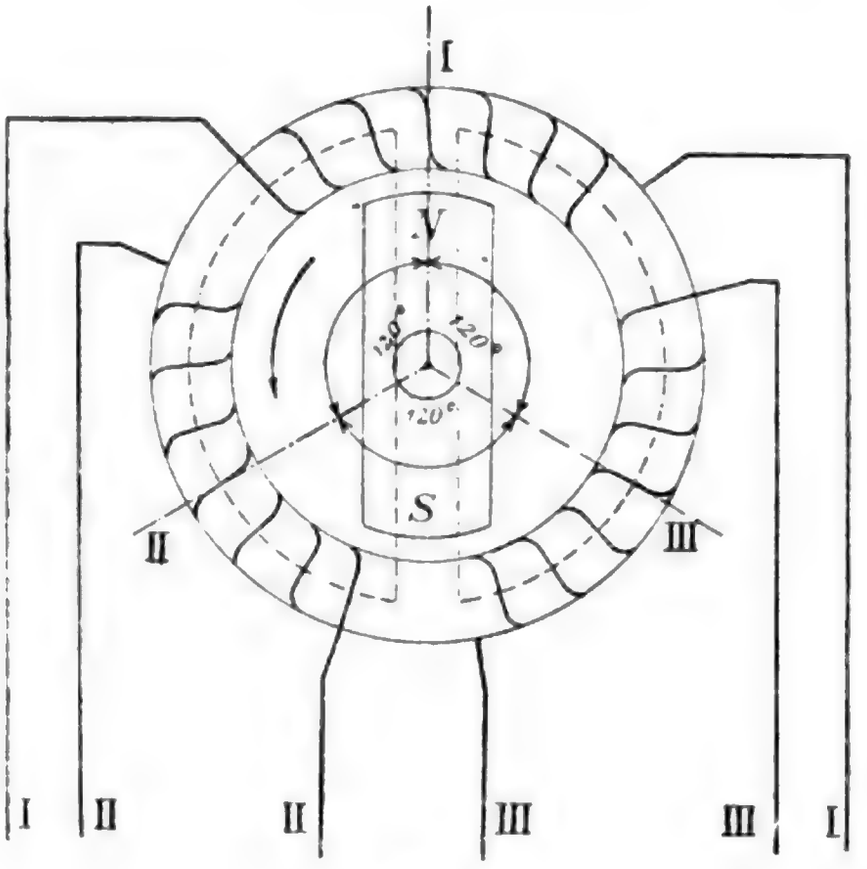


Fig. 35.

hat der Eisenring nur drei Wicklungen, deren Symmetrieachsen miteinander je 120^0 einschließen (Fig. 35). Im Hohlraume des Ringes ist ein Magnet drehbar angeordnet; dreht sich dieser Magnet mit konstanter Winkelgeschwindigkeit, dann entsteht in den Wicklungen dreiphasiger Wechselstrom.

Zur Fortleitung dieser Ströme sind in der Figur sechs Leiter angenommen. Man kann aber Schaltungen anwenden, mit deren Hilfe für das

ganze Stromsystem nur drei Außenleiter genügend sind.

Man unterscheidet Parallel- und Serienschaltung bei der Drehstromverkettung. Erstere nennt man auch Dreieck-, letztere Sternschaltung, da die entsprechenden Schaltungsfiguren eine dreieckige, beziehungsweise sternähnliche Form haben.

Die Dreieckschaltung läßt sich aus der Fig. 35 ableiten. Vermehrt man nämlich die Windungszahlen aller Phasen solange, bis der Eisenring mit

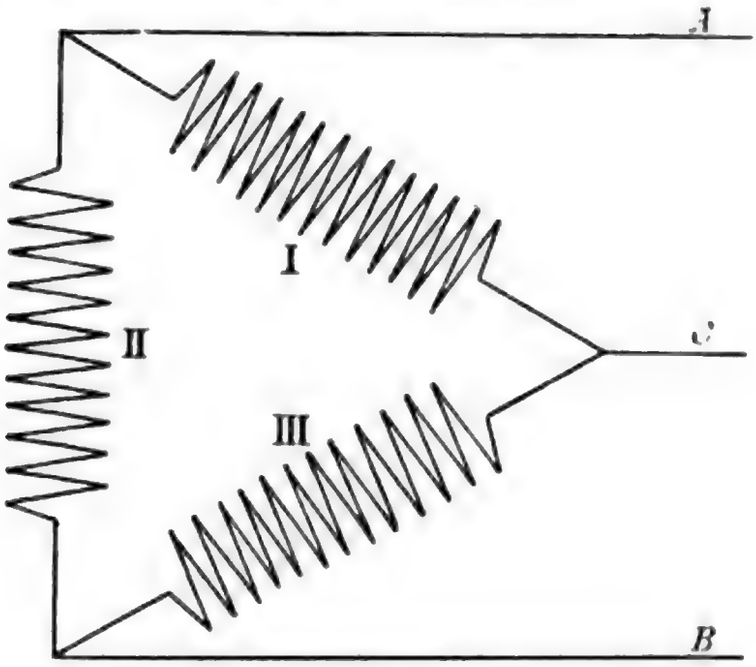


Fig. 36.

Windungen gleichmäßig bedeckt ist, d. h. bewickelt man den Ring gleichmäßig mit fortlaufenden Windungen und hält die in der Figur angegebenen und voneinander um 120° an der Ringperipherie abstehenden Abzweigungspunkte der Außenleiter bei, dann können die Leiter *I III*, *II III* und *III I* in je einen Leiter vereinigt werden und man hat dann für die Fernleitung des Drehstromes nur mehr drei Leiter nötig.

Gibt man den drei Windungsteilen der Ringwicklung statt der Kreissegmentform gerade Ge-

stalt und verbindet die zusammengehörigen Endpunkte miteinander, dann erhält man Fig. 36, welche die schematische Darstellung der Parallelschaltung des Drehstromes ist. Die Spulen haben dieselben Bezeichnungen wie in Fig. 35, nur die zusammengefaßten Hauptleiter sind mit *A*, *B* und *C* bezeichnet.

Es kann aber auch eine andere Schaltung der drei Spulen des Eisenringes durchgeführt werden. Bei der eben beschriebenen Schaltung wurde das

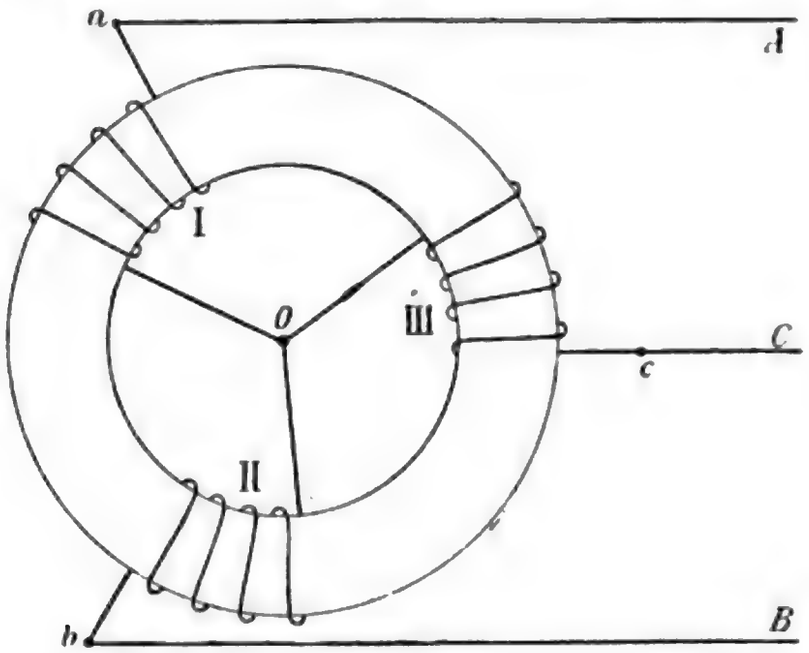


Fig. 37.

Ende des ersten Wicklungsteiles mit dem Anfange des zweiten verbunden, dann das Ende des zweiten mit dem Anfange des dritten und endlich das Ende des dritten mit dem Anfange des ersten zusammenschaltet. Man erhielt so einen in sich geschlossenen Stromkreis.

Bei der nun zu behandelnden Schaltung sind alle Enden der Wicklungsteile untereinander verbunden und die Anfangspunkte mit den Außenleitern zusammengeschaltet (Fig. 37). Die drei Wicklungen sind *I*, *II* und *III* mit den Anfangspunkten *a*, *b* und *c*. Die Endpunkte liegen

Digitized by Google

bei O in einem Punkte zusammen. Dieser Punkt heißt der neutrale Punkt und kann auch mit einem Außenleiter versehen werden. Wird in den Dreiphasenkreis ein Verbrauchsapparat mit derselben Schaltung als dieser Generator eingeschaltet und sind die Ströme in allen drei Hauptleitungen gleich, dann fließt in dem zum neutralen Punkte gehörenden vierten Leiter kein Strom.

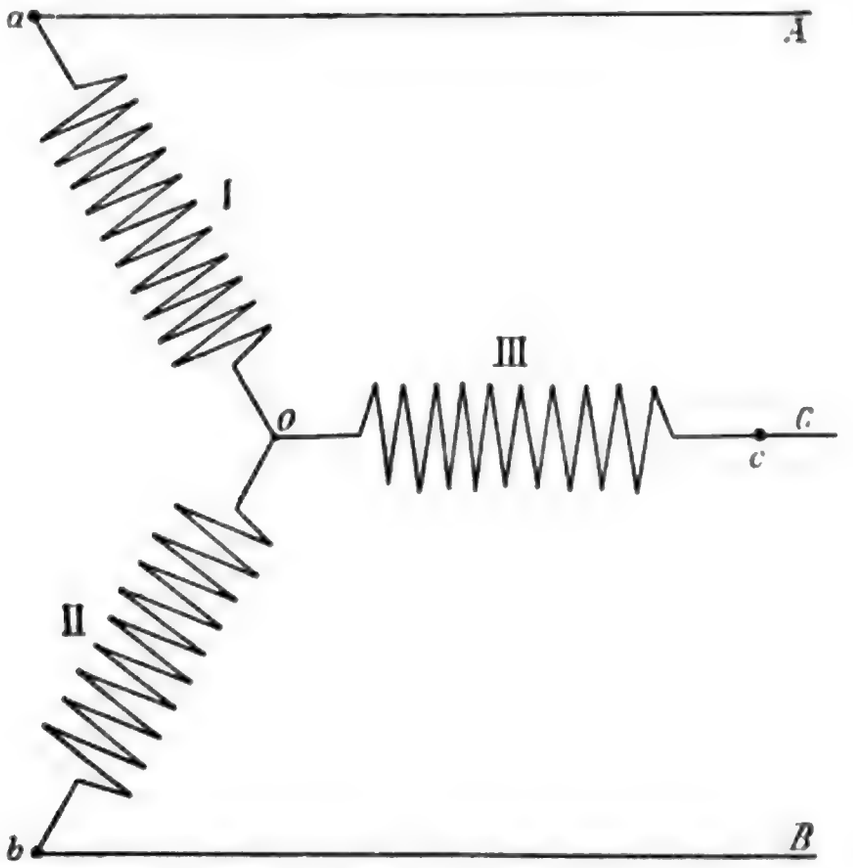


Fig. 38.

Verläßt man in Fig. 37 den Eisenring und biegt die drei Wicklungsteile radial nach auswärts, dann bekommt man Fig. 38, welche eine schematische Darstellung dieser Schaltungsweise ist.

Diese Schaltung nennt man Stern- oder Serienschaltung. Inwiefern diese beiden Schaltungen voneinander abweichen, werden wir später, bei der Behandlung der Strom- und Spannungsverhältnisse sehen.

Hier sei noch die kombinierte Schaltung erwähnt. Sie ist die Kombination dieser beiden Schaltungen und ist ihr Wesen aus Fig. 39 ohne weiteres ersichtlich.

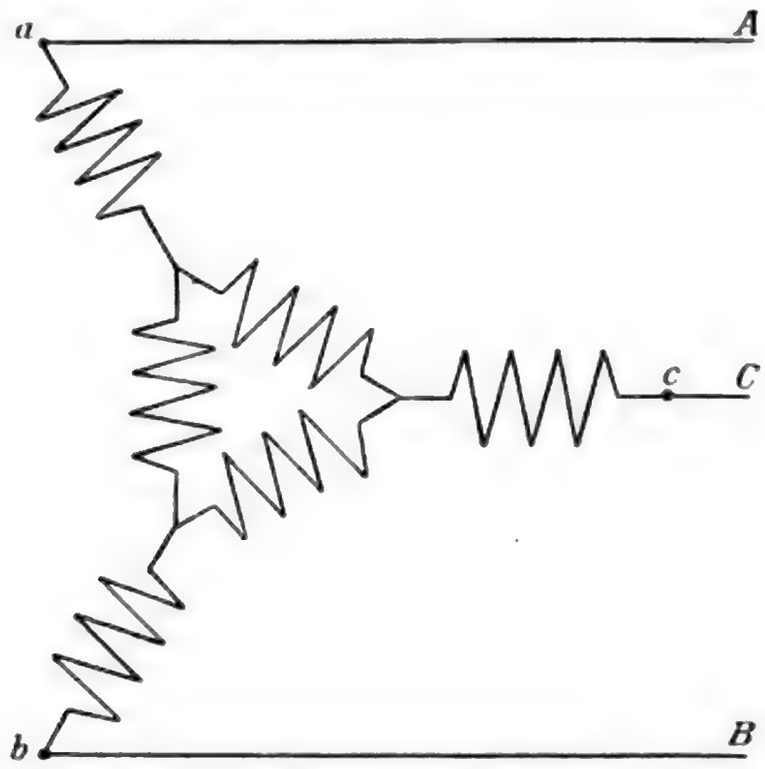


Fig. 39.

Erzeugung des Drehstromes.

In Kapitel II haben wir gesehen, daß Zweiphasenströme aus einem Grammeschen Ringe hergestellt werden können, und zwar in der Weise, daß man vier symmetrisch liegende Punkte mit Schleifringen verbindet. Sehen wir nun, in welcher Weise läßt sich der Drehstrom aus dieser Armatur erzeugen.

Fig. 35 kann man sich auch umgekehrt denken, nämlich daß der Magnet steht und der Eisenring sich dreht. Ist dann noch der Magnet außerhalb angeordnet, dann haben wir die zweipolige Grammesche Maschine vor uns, deren Armatur Drehstrom liefert. Nachdem nun der Ring sich dreht, müssen die Enden der Wicklungsteile zu

Digitized by Google

Schleifringen geführt werden. Wollte man die Verkettung der Ströme außerhalb der Armatur bewerkstelligen, dann müßte man sechs Schleifringe haben, es ist aber vorteilhafter, diese Schaltungen in der Maschine vorzunehmen, denn in diesem Falle genügen drei, höchstens vier Schleifringe.

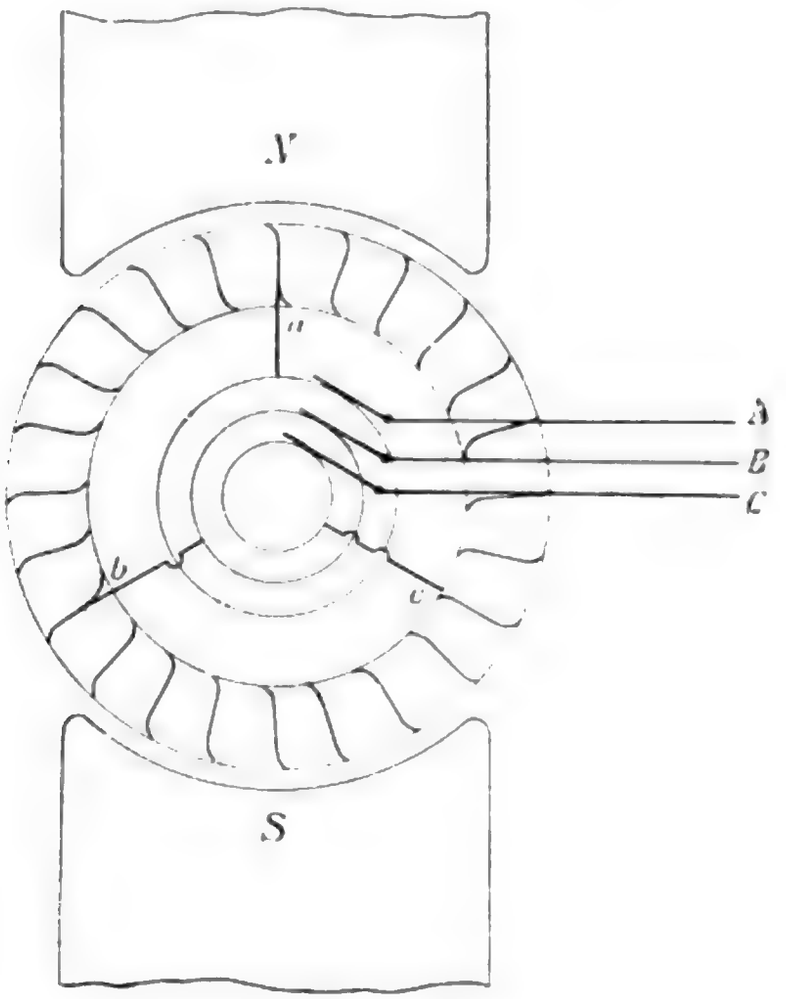


Fig. 40.

Fig. 40 stellt eine zweipolige Grammesche Maschine dar, welche Drehstrom in Dreieckschaltung erzeugt. Von der gleichmäßig bewickelten Armatur führen aus den symmetrisch gelegenen Punkten *a*, *b* und *c* Abzweigungen zu Schleifringen, auf welche die mit den Außenleitern *A*, *B* und *C* verbundenen Bürsten aufliegen. Es ist ohne weiteres einzusehen, daß die Schaltung mit der in

Fig. 36 dargestellten schematischen Anordnung übereinstimmt.

Bei der Sternschaltung erhält die Maschine vier isolierte Schleifringe. Drei gehören zu den Hauptleitungen, einer zur Ausgleichsleitung vom neutralen Punkte. Dieser letztere kann auch weg-

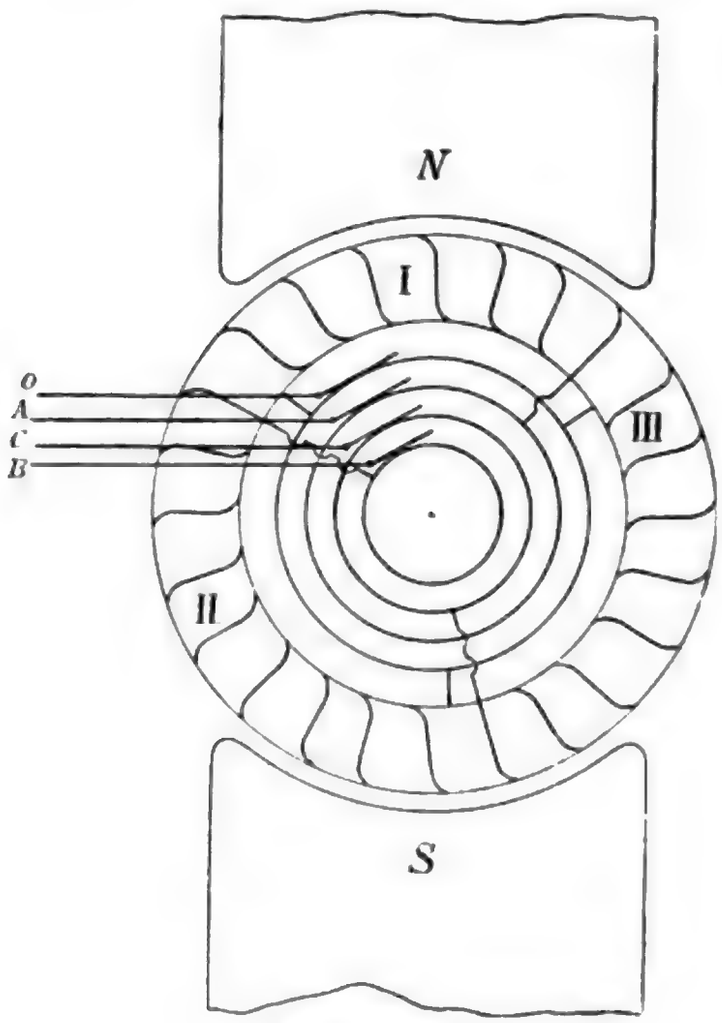


Fig. 41.

gelassen werden, in welchem Falle dann wie zuvor, drei Schleifringe genügen.

Die Schaltung der Armatur ist aus Fig. 41 ersichtlich. Die Wicklung des Ringes ist auf drei gleiche Teile geteilt, diese sind dann durch einen Schleifring so miteinander verbunden, daß die Enden der einzelnen Teile zu demselben Schleifring führen. Dies bedeutet soviel, als wenn diese

Digitized by Google

drei Enden in einen Punkt vereinigt würden, denn der Widerstand dieses Schleifringes ist so klein, daß er vernachlässigt werden kann. Die Anfänge der Wicklungsteile führen gesondert zu anderen drei, voneinander isolierten Schleifringen, mit welchen die Außenleiter A, B und C in Verbindung stehen. Der Leiter O führt vom den neutralen Punkt darstellenden Schleifring in den äußeren Stromkreis.

Strom- und Spannungsverhältnisse bei den verschiedenen Drehstromschaltungen.

In folgendem wollen wir uns mit jenen Verhältnissen befassen, welche zwischen den einzelnen Strom- und Spannungswerten des dreiphasigen Wechselstromes bei den verschiedenen Schaltungsweisen bestehen. Wir werden hierbei mit der Parallelschaltung anfangen und nachher auf die Serienschaltung übergehen.

Dreieckschaltung.

Um die Behandlung unserer Untersuchungen einfacher gestalten zu können, wollen wir einige abgekürzte Benennungen annehmen. Der Strom in den einzelnen Windungsteilen der Armatur sei Zweigstrom, der in den Leitungen fließende der Leitungsstrom. Zwischen zwei Hauptleitern tritt die Phasenspannung auf.

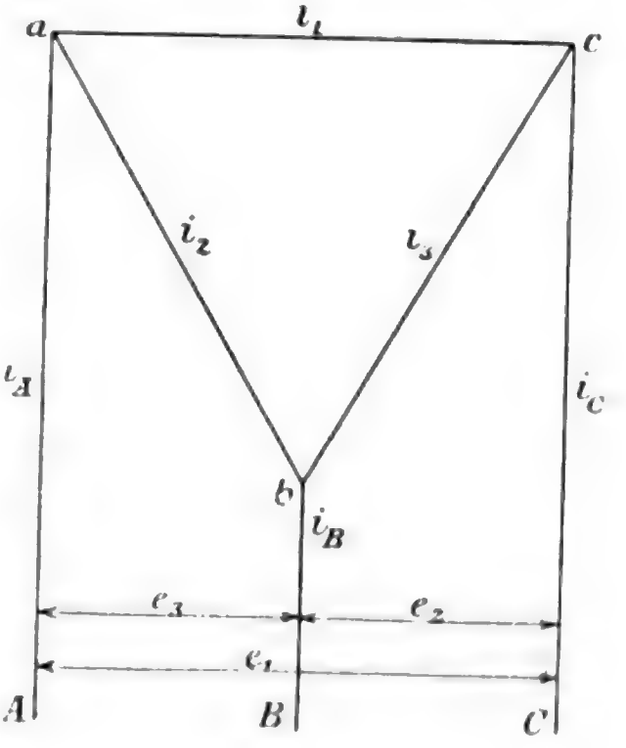


Fig. 42.

Seien die Zweigströme i_1, i_2 und i_3, die Leitungsströme i_A, i_B und i_C. Bei Dreieckschaltung ist die Spannungsdifferenz zwischen zwei Hauptleitungen gleich mit jener Spannung, welche in der Armatur zwischen benachbarten Abzweigpunkten auftritt (Fig. 42).

Die Leitungsströme sind, wie aus der Figur ersichtlich, resultierende Ströme, und zwar haben die Komponentströme, in diesem Falle die Zweigströme eine Phasendifferenz von 120°. Nachdem die drei Ströme, wie aus dem Wellendiagramm in Fig. 33 ersichtlich, immer einander entgegengesetzte Veränderungstendenzen haben, müssen die Komponentströme bei der geometrischen Summation mit entsprechendem Vorzeichen genommen werden, es wird also für den Leitungsstrom i_A die Vektorgleichung

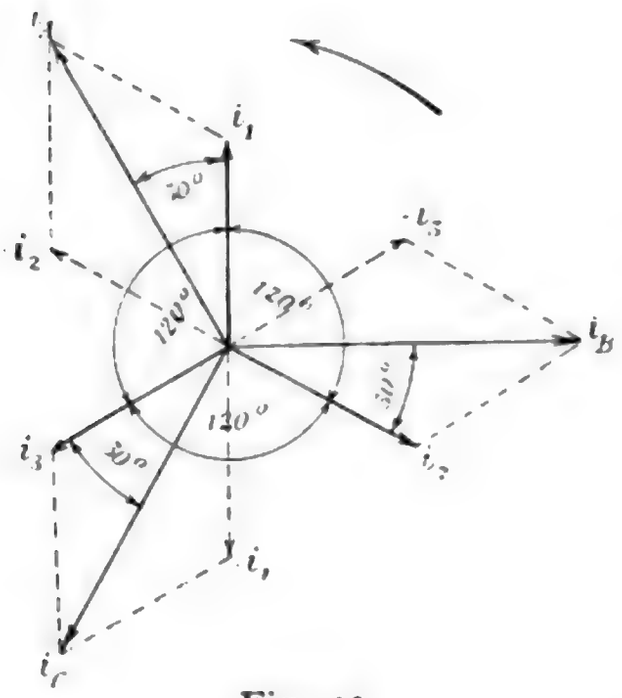


Fig. 43.

$$i_A = (+i_1)(+)(-i_2)$$

bestehen, wo (+) eine geometrische Summation bedeutet.

Im Vektor- oder Polardiagramm der Dreiphasenströme bilden i_1, i_2 und i_3 miteinander die Phasenwinkel von je 120° (Fig. 43). Wollen wir nun den resultierenden Strom i_A bezüglich seiner Größe und Lage kennen, dann tragen wir im Sinne der obigen Gleichung i_2 in entgegengesetzter Richtung auf die Verlängerung des Vektors i_2 und bestimmen aus i_1 und $-i_2$ den Vektor i_A in

derselben Weise wie in der Mechanik die resultierende Kraft zweier Komponentkräfte.

Nachdem i_1 und $-i_2$ miteinander den Phasenwinkel von 60^0 einschließen und alle drei Zweigströme einander gleich sind, wird die resultierende Stromstärke diesen Winkel auf zwei gleiche Teile teilen und mit jeder der Komponentstromrichtungen den Winkel von 30^0 einschließen. Nehmen wir die Rotationsrichtung der Stromvektoren auch noch in Betracht, dann sehen wir, daß der Leitungsstrom i_A zum Teilstrome i_1 in der Phase um 30^0 voreilt.

Dasselbe Resultat erreicht man, wenn man die Leitungstromvektoren i_B und i_C konstruiert. Diese eilen den Zweigströmen i_2, beziehungsweise i_3 in der Phase um 30^0 voraus. Die Leitungsströme haben unter sich ebenso wie die Zweigströme eine Phasendifferenz von 120^0.

Für i_B und i_C stehen in analoger Weise wie für i_A folgende Vektorgleichungen:

$$i_B = (+i_2)\,(+)\,(-i_3)$$

und

$$i_C = (+i_3)\,(+)\,(-i_1).$$

Die Konstruktion dieser Ströme erfolgt in derselben Weise, als bei i_A.

Die Größe des Leitungsstromes läßt sich aus dem Dreieck $i_A\,o\,i_1$ berechnen.

Laut Carnots Regel ist aus $i_A\,o\,i_1$ die Länge i_A:

$$i_A = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 - 2\,i_1\,i_2\,cos\,120^0}.$$

Nachdem aber

$$cos\,120^0 = -cos\,120^0 = -\frac{1}{2}$$

wird

$$i_A = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + i_1\,i_2}.$$

Digitized by Google

Die drei Stromvektoren i_1, i_2 und i_3 sind einander gleich, weshalb, wenn man mit i den Zweigstrom im allgemeinen bezeichnet, der Wert i_A, als

$$i_A = \sqrt{3\, i^2} = \sqrt{3}\, i$$

sich ergibt.

Bei Dreiphasenstrom in Parallel- oder Dreieckschaltung ist der resultierende Leitungsstrom $\sqrt{3}$-mal größer als ein Zweigstrom und er eilt dem Zweigstrome in der Phase um 30^0 voraus.

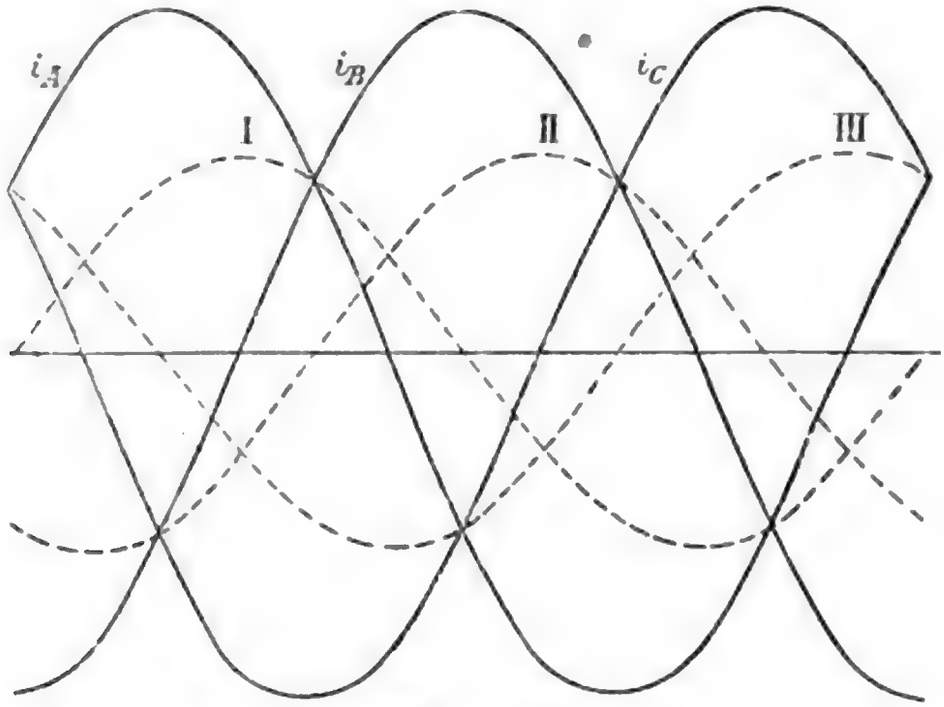


Fig. 44.

Sind i_1, i_2 und i_3 Maximalwerte, dann sind i_A, i_B und i_C auch solche. Für Effektivwerte bleibt derselbe Zusammenhang bestehen, denn diese Werte sind um dieselbe Konstante kleiner als die Scheitel- oder Maximalwerte.

In Fig. 44 sind die Zweig- und die Leitungsströme im Wellendiagramm dargestellt. Die gestrichelten Kurven sind die Zweig-, die voll ausgezogenen die Leitungsströme.

Die Phasenvoreilung des resultierenden Leitungsstromes kann auch analytisch folgendermaßen bewiesen werden.

Digitized by Google

Wir gehen aus der Bedingungsgleichung aus, daß

$$i_A = i_1 (+) - i_2.$$

Der Zusammenhang zwischen i_1 und dem Scheitelwerte J_1 ist bekanntlich:

$$i_1 = J_1 \sin \omega t.$$

Ferner für i_2:

$$i_2 = J_2 \sin (\omega t + 120^0).$$

Es wird also der Leitungsstrom durch die Gleichung

$$i_A = i_1 - i_2 = J_1 \sin \omega t - J_2 \sin (\omega t + 120^0)$$

bestimmt.

Dieser Ausdruck wird einfacher, wenn wir in Betracht ziehen, daß $J_1 = J_2 = J_3 = J$, und zwar wird:

$$i_A = J (\sin \omega t - \sin [\omega t + 120^0]).$$

Da aber

$$\sin (\omega t + 120^0) = \sin \omega t \cos 120^0 + \cos \omega t \sin 120^0$$

und

$$\cos 120^0 = -\frac{1}{2}.$$

Ferner

$$\sin 120^0 = \frac{1}{2}\sqrt{3}$$

ist

$$\sin (\omega t + 120^0) = -\frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{1}{2}\sqrt{3} \cos \omega t$$

also

$$i_A = J\left(\sin \omega t + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{1}{2}\sqrt{3} \cos \omega t\right)$$

$$= J\left(\frac{3}{2} \sin \omega t - \frac{1}{2}\sqrt{3} \cos \omega t\right)$$

oder

$$i_A = \sqrt{3}\, J \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t - \frac{1}{2} \cos \omega t \right).$$

Für

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = \cos 30^0$$

und

$$\frac{1}{2} = \sin 30^0$$

eingesetzt, wird

$$i_A = \sqrt{3}\, J (\sin \omega t \cos 30^0 - \cos \omega t \sin 30^0)$$

oder

$$i_A = \sqrt{3}\, J \sin (\omega t - 30^0)$$

womit unsere Behauptung bewiesen ist.

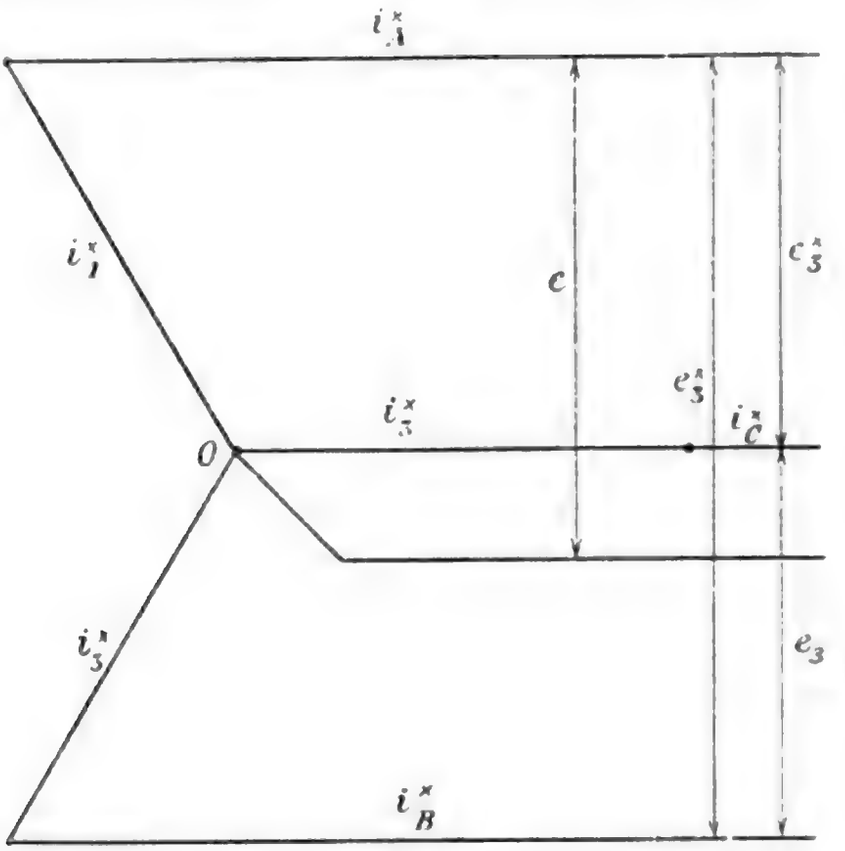


Fig. 45.

Sternschaltung.

Bei der Stern- oder Serienschaltung der dreiphasigen Wechselströme (Fig. 45) fließt dieselbe

Stromstärke durch die Hauptleitungen und die einzelnen Wicklungsteile. Hier ist also $i_A = i_B = i_C = i_1 = i_2 = i_3$, vorausgesetzt, daß die einzelnen Phasen gleich belastet sind und die Phasenverschiebung in allen Phasen dieselbe ist.

Bezeichnen wir die Spannungsdifferenz zwischen den Endpunkten einer Wicklungsteilung mit e_3, die Phasenspannung, d. h. die Spannung zwischen

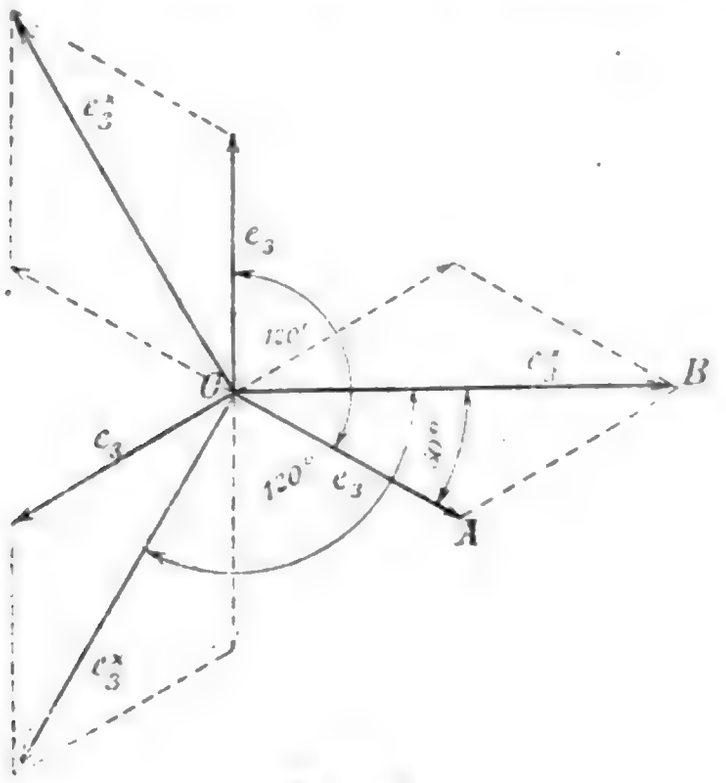


Fig. 46.

zwei Hauptleitern mit e_3', dann besteht zwischen diesen Größen der Zusammenhang, daß

$$e_3' = \sqrt{3}\, e_3$$

wie dies aus folgenden Ausführungen hervorgeht.

Jede Phasenspannung ergibt sich als die Resultante zweier e_3 Spannungen, welche eine Phasendifferenz von 120^0 haben. Nachdem die Spannungsdifferenzen zwischen den Endpunkten der Wicklungsteilungen, die sogenannten Sternspannungen einander entgegengesetzt sind, besteht für die

resultierende oder verkettete Spannung $e_3^{\times}$ die Vektorgleichung:

$$e_3^{\times} = (+ e_3)(+)(- e_3).$$

Aus dem schiefwinkeligen Dreieck OAB (Fig. 46) wird:

$$\overline{OB} = e_3^{\times} = \sqrt{e_3^2 + e_3^2 - 2\, e_3^2 \cos 120^0}$$

oder

$$e_3^{\times} = \sqrt{2\, e_3^2 + e_3^2} = \sqrt{3}\, e_3.$$

Die Lage dieses Vektors läßt sich auch bestimmen, nämlich:

$$\begin{aligned} e_3^{\times} &= e_3 (-) e_3 = E_3 \sin \omega t - E_3 \sin (\omega t + 120^0) \\ &= E_3 (\sin \omega t - \sin \omega t \cos 120^0 - \cos \omega t \sin 120^0) \\ &= E_3 \sqrt{3} \sin (\omega t - 30^0) \end{aligned}$$

in derselben Weise wie bei den Strömen auf Seite 56.

Der Vektor der verketteten Spannung ist $\sqrt{3}$-mal größer als jener der Sternspannung, außerdem eilt sie derselben in der Phase um 30^0 vor.

Leistung des dreiphasigen Wechselstromes.

Um die Leistung des Drehstromes bestimmen zu können, nimmt man die Leistung des einen Zweiges und multipliziert mit 3. Die Leistung eines Zweiges bei Dreieckschaltung ist bei der Phasenverschiebung φ

$$W_3 = e_3\, i \cos \varphi$$

wo e_3 die effektive Spannung zwischen zwei Hauptleitern, i die Stromstärke in der Zweigleitung bedeutet.

Die Gesamtleistung wird demnach

$$W = 3\, W_3 = 3\, e_3\, i \cos \varphi.$$

Digitized by Google

Führt man statt dem Zweigstrom den Leitungsstrom in letzte Gleichung, dann wird, nachdem:

$$i_3 = \sqrt{3}\, i$$

$$W = 3\, e_3 \frac{i_3}{\sqrt{3}} \cos\varphi = \sqrt{3}\, e_3\, i_3 \cos\varphi.$$

Bei Sternschaltung ist

$$W_3 = e_3\, i_3^{\times} \cos\varphi$$

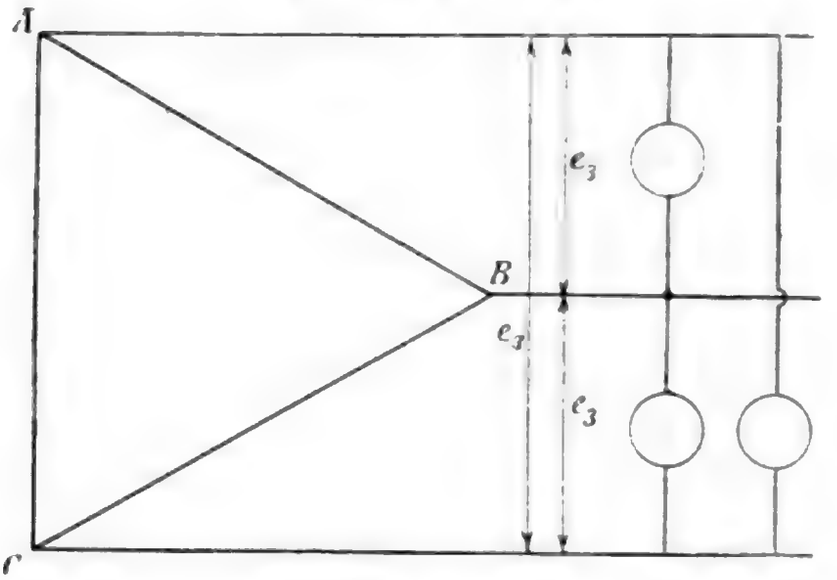


Fig. 47.

und die Gesamtleistung

$$W = 3\, W_3 = 3\, e_3\, i_3^{\times} \cos\varphi.$$

Bei Serienschaltung ist der Zusammenhang zwischen Stern- und verketteter Spannung

$$e_3^{\times} = \sqrt{3}\, e_3$$

folglich wird

$$W = 3 \frac{e_3^{\times}}{\sqrt{3}}\, i_3^{\times} \cos\varphi = \sqrt{3}\, e_3^{\times}\, i_3^{\times} \cos\varphi.$$

Bei Drehstrom ist die Gesamtleistung bei gleicher Phasenverschiebung in allen Zweigen gleich mit dem Produkte der Spannungsdifferenz

zwischen zwei Hauptleitern, mit dem Leitungsstrome in einem Hauptleiter, ferner dem Leitungsfaktor und $\sqrt{3}$ oder mit anderen Worten, die Gesamtleistung des Drehstromes ergibt sich bei gleichen Verhältnissen in den drei Phasen, als die $\sqrt{3}$ fache der Leistung einer Phase unabhängig davon, ob die Armatur Dreieck- oder Sternschaltung hat.

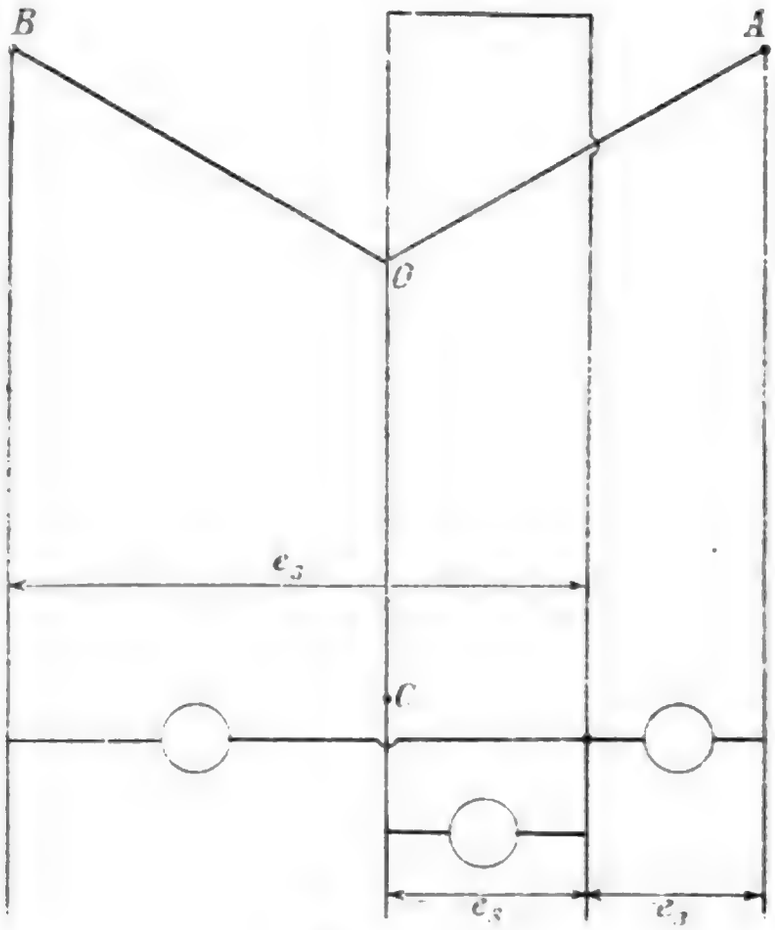


Fig. 48.

Der Fall, daß die Strom- und Phasenverhältnisse in allen drei Zweigen dieselben sind, kommt in der Praxis sehr selten vor. Dient der Drehstrom zur Beleuchtung, dann werden die Lampen zwischen je zwei Hauptleitungen geschaltet (Fig. 47). Um in den einzelnen Leitungen gleiche Stromstärken haben zu können, müssen die Lampen gleichmäßig verteilt werden. Diese Verteilung läßt sich aber

nur schwierig durchführen, weshalb man besser tut, daß man eine Ausgleichsleitung benutzt. In diesem Falle werden die Lampen zwischen diese Ausgleichsleitung und eine Hauptleitung geschaltet (Fig. 48).

Will man bei ungleichmäßiger Verteilung die Leistung des Drehstromes messen, dann verwendet man drei Wattmeter und summiert die so gemessenen drei Leistungen. Die Schaltung ist aus Fig. 49 ersichtlich.

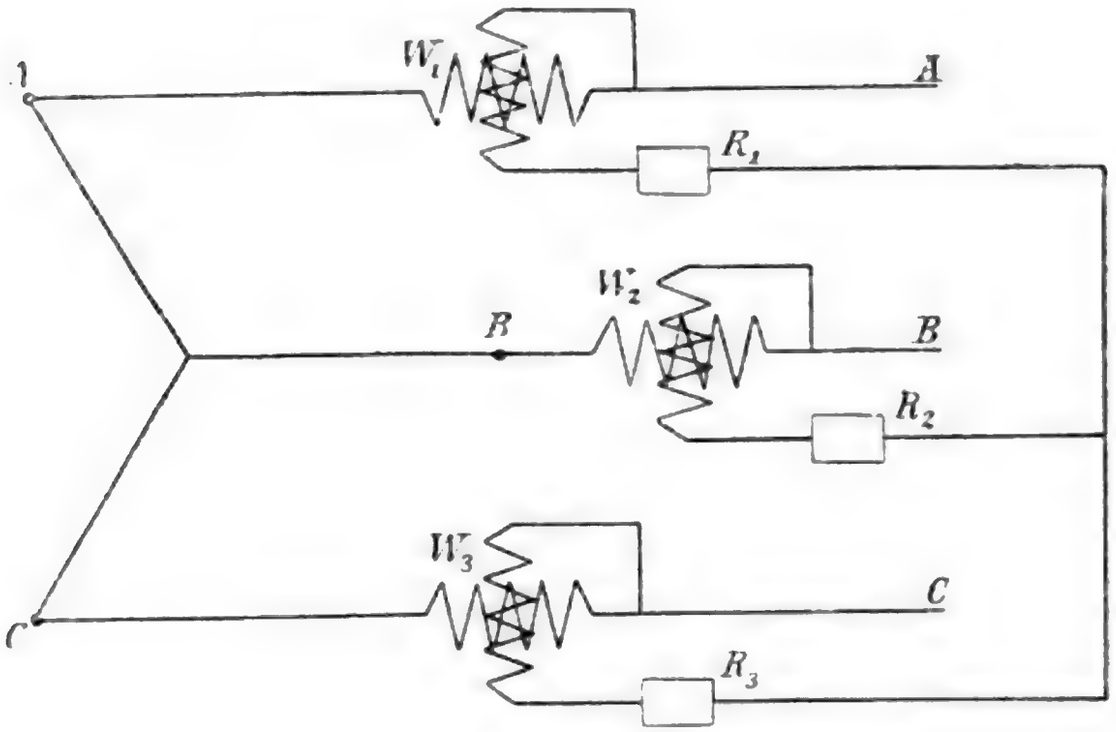


Fig. 49.

Die Hauptspulen der drei Wattmeter W_1, W_2, W_3 sind in die Hauptleitungen des Drehstromnetzes geschaltet, während die Spannungsspulen mit den Vorschaltwiderständen R_1, R_2 und R_3 so abgezweigt sind, daß sie einen gemeinsamen neutralen Punkt haben.

Bei solchen mehrphasigen Stromkreisen, bei welchen die einzelnen Phasen selbständig, die also miteinander nicht verkettet sind, müssen bei der Effektmessung, verschiedene Phasenbelastungen vorausgesetzt, stets soviel Meßinstrumente ver-

wendet werden, als Phasen vorhanden sind. Sind dagegen die einzelnen Phasen in Verkettung, also nicht mehr voneinander unabhängig, dann können in den Messungen Vereinfachungen durchgeführt werden, welche mit sich bringen, daß weniger Meßinstrumente als Phasen genügend sind.

Dieser Fall tritt ein bei verkettetem Drehstrom. Man kann den Drehstromeffekt mit zwei, ja unter Umständen auch nur mit einem Wattmeter messen. Die Grundlage dieser Meßmethode ist aus folgendem zu ersehen.

Sind in einem bestimmten Zeitpunkte die Momentwerte der Ströme und der Spannungen in den einzelnen Phasen i_1, i_2, i_3, beziehungsweise e_1, e_2, e_3, dann ist in diesem Zeitpunkte der Drehstromeffekt

$$w = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3.$$

Außerdem ist für die Momentwerte

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

also

$$i_1 = - i_2 - i_3$$

und

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0$$

und

$$e_1 = - e_2 - e_3.$$

Bei Dreieckschaltung ergeben sich die resultierenden Leitungsströme in ihren Momentwerten, als die algebraischen Summen der Komponentströme, also (Fig. 42):

$$i_A = i_2 - i_1;\ i_B = i_3 - i_2;\ i_C = i_1 - i_3;$$

also

$$w = - e_2 i_1 - e_3 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3$$

oder

$$w = e_2 (i_2 - i_1) + e_3 (i_3 - i_1).$$

Für $(i_2 - i_1)$ und $(i_3 - i_1)$ die Werte i_A, beziehungsweise $-i_C$ eingesetzt

$$w = e_2 i_A - e_3 i_C.$$

e_2 und e_3 sind die Spannungsdifferenzen zwischen zwei Hauptleitungen, i_A und i_C die Stromstärken in denselben. Geht man nun von den Momentwerten auf Effektivwerte über, dann ist der Ausdruck des Drehstromeffektes

$$W = W_1 \pm W_3.$$

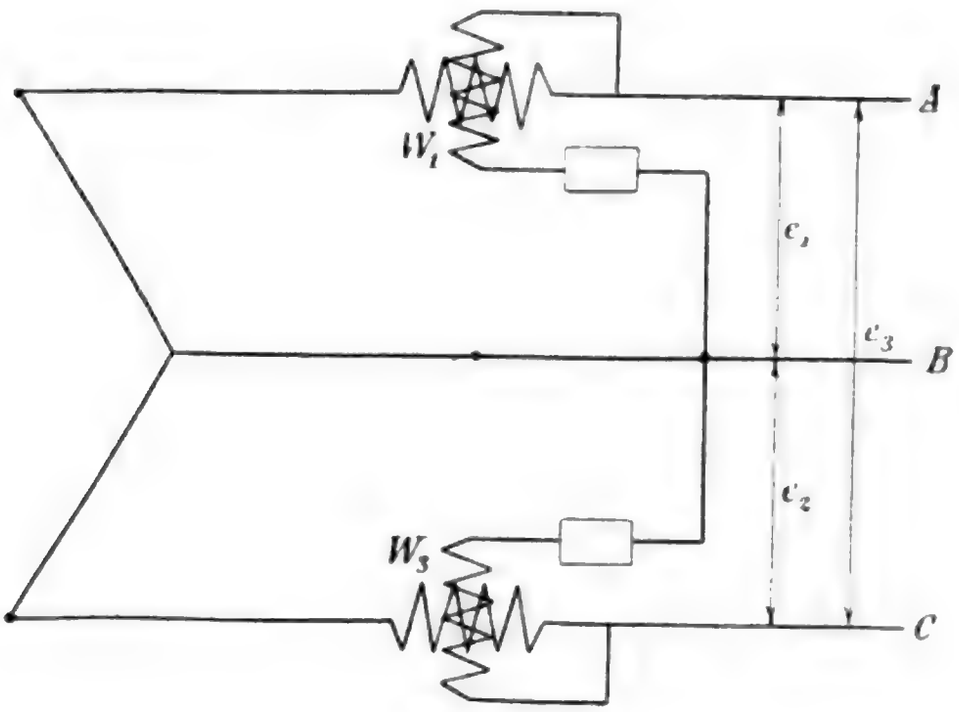


Fig. 50.

Die Schaltungsweise ist aus Fig. 50 ersichtlich. Die zwei Wattmeter W_1 und W_3 sind in die Hauptleitungen A und C geschaltet, die Spannungsspulen zwischen AB und BC, da die Spannungsdifferenzen e_2 und e_3 zwischen diesen Leitungen auftreten. Die Berechnung der Leistung aus den Meßwerten erfolgt folgendermaßen:

Seien die Konstanten der Wattmeter c_1 und c_3, die Torsionswinkel α_1 und α_3, die Vorschaltwiderstände R_1 und R_3, dann wird

$$W_1 = c_1 \alpha_1 R_1$$

$$W_3 = c_3 \alpha_3 R_3$$

und

$$W = c_1 \alpha_1 R_1 \pm c_3 \alpha_3 R_3.$$

Was die beiden Vorzeichen $\pm$ bedeuten, so ist (+) zu nehmen, wenn die Ausschläge nach derselben Seite und (—) wenn die Ausschläge der

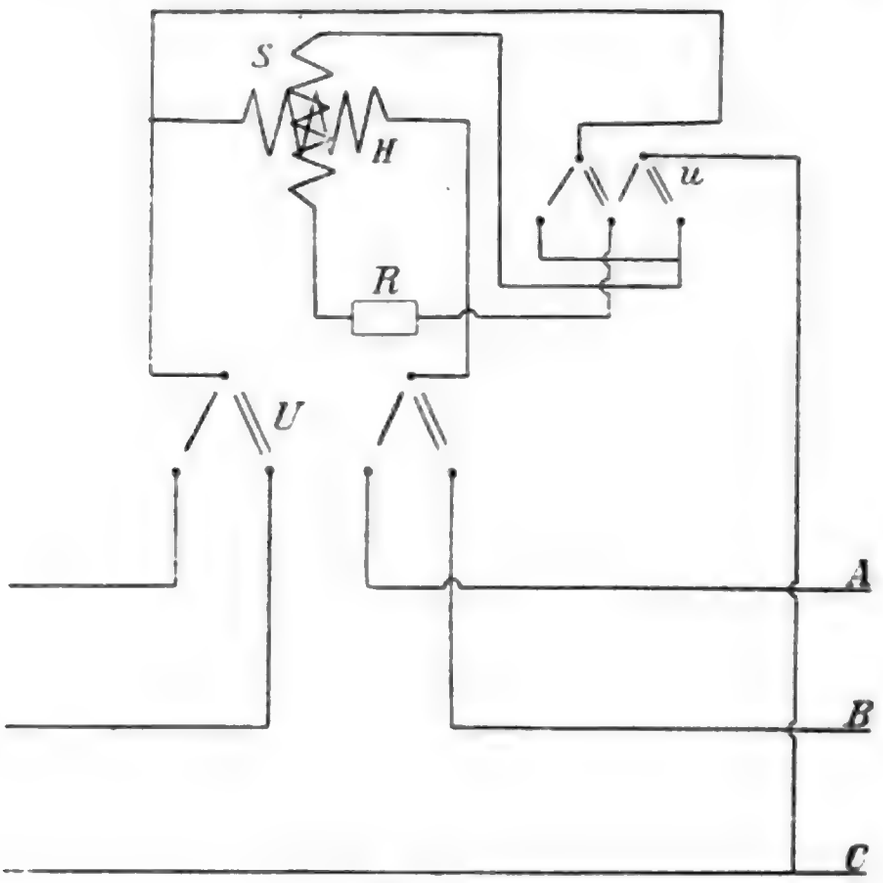


Fig. 51.

beweglichen Spulen nach entgegengesetzter Seite erfolgen.

Durch geeignete Umschalter läßt sich dieselbe Messung mit nur einem Wattmeter ausführen, wie aus Fig. 51 ersichtlich.

A, *B* und *C* sind die drei Hauptleitungen des Drehstromkreises. Zwei derselben werden zu dem Umschalter *U* geführt, der dritte Leiter wird nicht entzweigeschnitten. Mit Hilfe des Umschalters kann

man erreichen, daß bald der durch A fließende, bald jener durch B fließende Strom in die Hauptstromspule H des Wattmeters gelangt.

Der Spannungsstromkreis wird von der Hauptstromspule abgezweigt, wodurch erreicht wird, daß die Spannungsspule einmal mit A, ein anderesmal mit B in Verbindung kommt. Das zweite Ende dieses Stromkreises ist ständig mit der Leitung C verbunden. Der Kommutator u dient dazu, daß das Wattmeter in derselben Richtung abgelenkt wird. Hierbei muß auf die Stellung des Kommutators geachtet werden, denn muß bei der Umschaltung von U auch der Spannungsstromkreis kommutiert werden, um in derselben Richtung die Torsionswinkel ablesen zu können, dann sind die zwei Wattmeterangaben mit entgegengesetztem Vorzeichen zu nehmen.

Ein weiterer Umstand, worauf besonders zu achten ist, ist der, daß durch die Umschaltung der Stromkreis nicht unterbrochen werden darf. Man muß bei Umschaltung den betreffenden Leiter beim Umschalter kurzschließen und dasselbe bei weiterer Umschaltung mit dem zweiten Hauptleiter vornehmen.

Es ist auch nicht zu vergessen, daß der Vorschaltwiderstand R stets vor dem Kommutator u, also unmittelbar nach der Abzweigung vom Hauptleiter einzuschalten ist und auf keinen Fall nach dem Kommutator. Diese Vorsichtsmaßregel ist darum nötig, weil im entgegengesetzten Falle im Kommutator bei der Gesamtspannung Kurzschluß entsteht, welcher den Kommutator zugrunde richtet. Bei der vorgeschriebenen Schaltung wird beim Kommutieren nur die bewegliche Spule kurzgeschlossen, im übrigen Teile des Spannungsstromkreises bleibt aber der große Widerstand R ständig eingeschaltet, was ein Anwachsen des Stromes über normale Grenzen verhindert.

Zusammenhang zwischen der Drehstrom- und der Gleichstromspannung und Stromstärke im Falle, wenn der Drehstrom aus einer Gleichstromarmatur erzeugt wird.

Der Dreiphasenstrom kann nach der bei Fig. 40 beschriebenen Anordnung aus einer Gleichstromarmatur hergestellt werden, wenn man drei symmetrisch gelegene Punkte der Wicklung mit drei voneinander isolierten Schleifringen verbindet. In den drei mit den Schleifbürsten verbundenen Außenleitern $A\,B\,C$ fließt Drehstrom.

Dieselbe Armatur liefert aber auch gleichzeitig Gleichstrom, wenn die Windungen mit den Segmenten eines Kollektors verbunden werden. Zwischen der an den Gleichstrom führenden Bürsten gemessenen Gleichstromspannung und der zwischen zwei Schleifringen auftretenden Drehstromspannung bestehen gewisse Beziehungen; unsere Aufgabe sei nun, diese Beziehungen zu untersuchen.

Man unterscheidet beim Drehstrome Dreieck- und Sternschaltung und demensprechend werden obengenannte Beziehungen andere sein. Befassen wir uns zunächst mit der Dreieckschaltung.

Sei die Gleichstromspannung bei der zweipoligen Maschine e, und die der Maximalbelastung entsprechende Stromstärke im äußeren Stromkreise i. Es wird demnach die Maximal-Gleichstromleistung der Maschine durch die Gleichung:

$$W = e\,i$$

ausgedrückt.

Betrachten wir nun unsere auf die Gleich- und Wechselstromspannungen Bezug nehmende Gleichungen, so finden wir, daß bei Parallelschaltung

$$e_2 = \frac{e}{\sqrt{2}}.$$

Digitized by Google

Ferner

$$e_4 = \frac{e}{2}.$$

Dieselben Werte können wir aber auch folgendermaßen schreiben:

$$e_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{2} e$$

und

$$e_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{4} e.$$

In analoger Weise wird bei Dreiphasenstrom in Dreieckschaltung:

$$e_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{3} e$$

oder nachdem

$$\sin \frac{\pi}{3} = \sin 60^0 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$e_3 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} e$$

sein.

Die Leistung des Drehstromes ist

$$W_3 = \sqrt{3}\, e_3\, i_A$$

wo i_A den Strom in der Hauptleitung, und e_3 die Phasenspannung bedeuten. Nachdem der Zweigstrom bei Dreieckschaltung der $\frac{1}{\sqrt{3}}$-te Teil des Leitungsstromes ist, wird die obige Leistung auch folgendermaßen ausgedrückt:

$$W_3 = 3\, e_3\, i_3.$$

Den gefundenen Spannungswert eingesetzt, wird:

$$W_3 = 3 \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} e i_3.$$

Wir wollen aber wissen, in welchem Verhältnisse die maximale Drehstromleistung zur maximalen Gleichstromleistung steht, deshalb ist nötig zu wissen, wie groß i_3 werden kann.

Die Armaturerwärmung bleibt dieselbe, wenn

$$i_3 = \frac{i}{2}.$$

Dies ist der höchste, zulässige Effektivwert des dreiphasigen Wechselstromes.

Es wird nun:

$$W_3 = 3 \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} e \frac{i}{2} = \frac{3\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} e i.$$

Nachdem aber

$$e i = W$$

die maximale Gleichstromleistung, wird die Berechnungen durchgeführt:

$$W_3 = 0{,}917\ W$$

d. h. wird die Gleichstromarmatur zur Erzeugung von dreiphasigem Wechselstrom benutzt, dann ist ihre Leistung 8,3% kleiner, als wenn sie Gleichstrom erzeugen würde.

Bei Sternschaltung sind die Spannungsverhältnisse andere.

In diesem Falle fließt durch die Hauptleitungen und den Wicklungen der Armatur dieselbe Stromstärke, die Phasenspannung ist aber von der Sternspannung verschieden. Die Phasen- oder verkettete Spannung ist die Resultierende zweier

Sternspannungen, deren Phasenunterschied 120^0 beträgt. Ist demnach die Sternspannung e_3, dann wird die verkettete Spannung

$$e_3^{\wedge} = \sqrt{3}\, e_3$$

sein.

Nach den Vorhergehenden ist

$$e_3 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}\, e$$

der Gleichstromspannung, weshalb $e_3^{\times}$:

$$e_3^{\times} = \frac{3}{2\sqrt{2}}\, e.$$

Bei Sternschaltung kann der Leitungsstrom höchstens die halbe Stärke des maximalen Gleichstromes haben, denn nur in diesem Falle wird die Armaturerwärmung die gleiche als bei Gleichstrom sein, da nun Leitungsstrom und Zweigstrom identisch sind:

$$i_3^{\times} = i_A = \frac{i}{2}$$

und die Gesamtleistung des Drehstromes

$$W_3^{\times} = \sqrt{3}\, e_3^{\times} i_A = 3\, e_3\, i_3^{\times}$$

oder

$$W_3^{\times} = 3\,\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}\, e\,\frac{i}{2} = \frac{3\sqrt{3}}{4\sqrt{4}}\, e\, i$$

$$W_3^{\times} = \frac{3\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}\, W = 0{,}917\, W.$$

Das Resultat ist demnach das gleiche als bei der Dreieckschaltung. Hinsichtlich der Leistungen

ist also zwischen beiden Schaltungsweisen kein Unterschied, in beiden Fällen leistet die Armatur

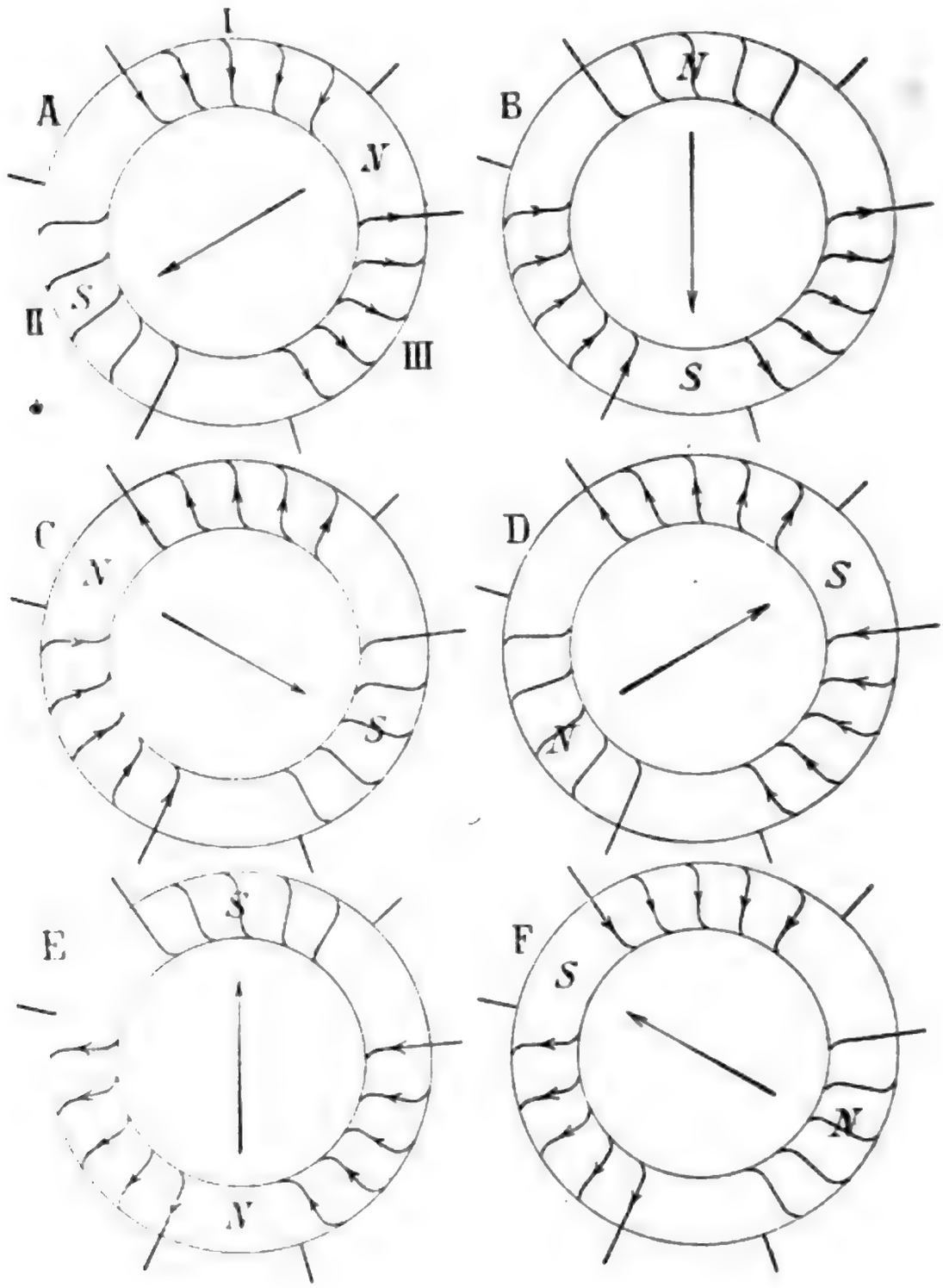


Fig. 52.

beim Drehstrom um 8,3% weniger als beim Gleichstrom.

Digitized by Google

Magnetisches Feld eines Drehstromes.

Der Drehstrom erzeugt ebenso wie der Zwei- oder Vierphasenstrom ein magnetisches Drehfeld, dessen Rotationsgeschwindigkeit von der Periodenzahl des zugeführten Wechselstromes und der Polzahl, also der Spulenanordnung des den Drehstrom konsumierenden Apparates abhängt. Wir wollen in folgendem den einfachsten Fall behandeln, bei welchem der Eisenring drei Wicklungen besitzt, welche ebenso angeordnet sind als die Windungen des Drehstromerzeugers in Fig. 35.

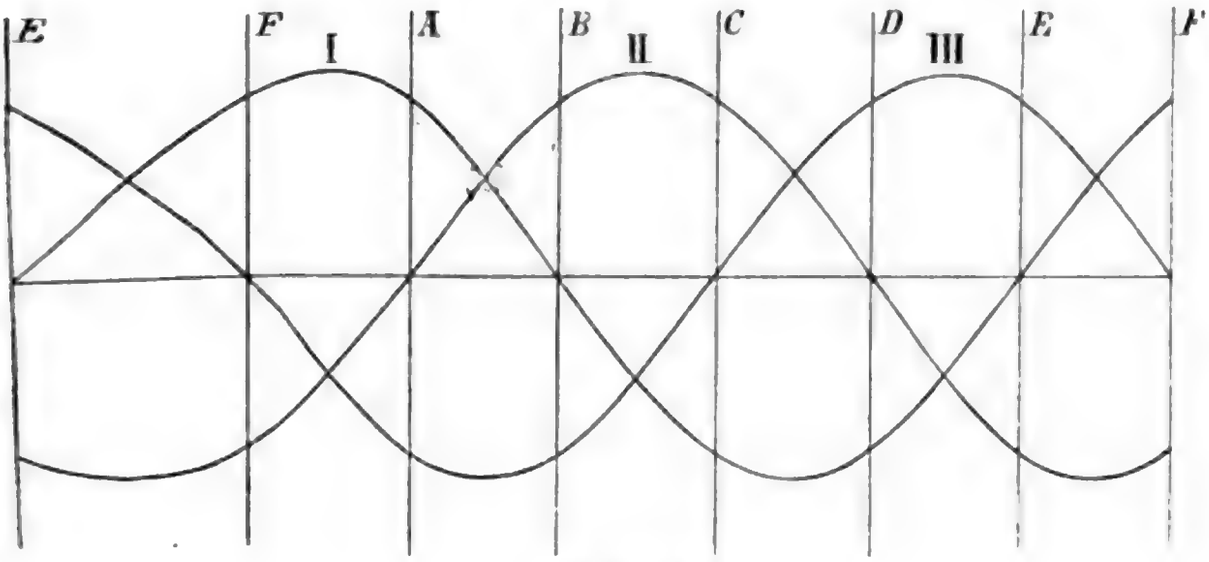


Fig. 53.

Dieser Eisenring sei in Fig. 52 schematisch dargestellt. In dem umschlossenen Raume ist eine Magnetnadel drehbar angeordnet, so daß sie sich nach dem jeweiligen resultierenden Drehfeld einstellen kann.

Damit das Zustandekommen des dreiphasigen Drehfeldes übersichtlicher vor Augen tritt, betrachten wir die einzelnen Phasen des Drehstromes in Fig. 53. Jeder einzelne Wechselstrom ruft ein magnetisches Feld hervor; die so entstehenden drei Felder summieren sich zu einem resultierenden Felde, dessen Richtung infolge der veränderlichen Kom-

Digitized by

ponenten wechselt und somit entsteht das magnetische Drehfeld. Die bewegliche Magnetnadel stellt sich immer in die Richtung des resultierenden Feldes, ihre Bewegung gibt also ein Bild von der Bewegungsrichtung des Drehfeldes.

Von den verschiedenen Phasen des Drehstromes betrachten wir nur jene, in denen ein Wechselstrom seinen Nullwert erreicht. Diese Phasen sind in Fig. 53 mit *A*—*F* bezeichnet, auch sind in Fig. 52 die korrespondierenden Figurenteile mit denselben Buchstaben bezeichnet.

Die Windungen *I*, *II* und *III* gehören zu je einer Phase, die Veränderungen der durch sie fließenden Stromstärken sind durch die Sinuskurven *I*, *II*, beziehungsweise *III* in Fig. 53 dargestellt.

In der Phase *A* ist der Momentwert des Stromfeldes *II* Null, während *I* und *III* gleich groß, jedoch entgegengesetzt gerichtet sind. In Fig. 52 *A* fließen daher nur durch *I* und *III* Ströme. und zwar in den einander entgegengesetzten Richtungen. In diesem Zeitpunkte wird also in dem, zwischen den Wicklungen *I* und *III* liegenden Eisenringteile ein Nordpol, diametral gegenüber ein Südpol liegen und die Magnetnadel wird die eingezeichnete Lage einnehmen.

Nach $\frac{1}{6}$ Periode, in der Phase *B*, ist *I* Null, *II* positiv und *III* negativ. Die magnetischen Verhältnisse sind dementsprechend anders, und sie sind aus der Fig. 52 *B* ersichtlich. Der Nordpol entsteht nun im oberen Teile des Ringes, in der Mitte der Wicklung *I*, während der Südpol nach unten, zwischen die Wicklungen *II* und *III* zu liegen kommt. Die Magnetnadel verbleibt nicht in ihrer früheren Stellung, sondern dreht sich um 60°.

Die weiteren Phasen *C*—*F* können in derselben Weise behandelt werden, wie die bisherigen,

Digitized by Google

man muß nur auf die Stromrichtungen achten. Aus den korrespondierenden Fig. 52 $C-F$ ersieht man, daß nach allen Sechstelperioden die Magnetnadel sich um je 60° dreht, so daß sie nach einer vollen Periode in ihre ursprüngliche Lage zurückkommt. Während also der Drehstrom eine Periode hatte, machte das Drehfeld eine volle Umdrehung.

Es darf aber hier nicht vergessen werden, daß wir mit dem einfachsten Fall zu tun hatten. Ist nämlich die Wicklung so durchgeführt, daß der Eisenring nicht drei, sondern sechs Spulen hat, wovon jede Dritte zu je einer Phase gehört, dann wird die Magnetnadel und somit auch das Drehfeld während einer vollen Periode nur eine halbe Umdrehung machen. Im allgemeinen ist die Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes umso kleiner, je mehr Unterabteilungen die Phasen besitzen.

Wollen wir nun die Intensität des resultierenden Magnetfeldes bestimmen, dann verfahren wir folgendermaßen.

Die drei Wechselströme rufen drei Magnetfelder hervor, welche gegeneinander in der Phase um 120° verschoben sind. Bedeuten daher h_1, h_2 und h_3 die Momentwerte der betreffenden Feldintensitäten in einem bestimmten Zeitpunkte, dann wird

$$h_1 = H_1 \sin \omega t$$

$$h_2 = H_2 \sin (\omega t + 120^0)$$

$$h_3 = H_3 \sin (\omega t + 240^0)$$

wo H_1, H_2 und H_3 die entsprechenden Maximalwerte bedeuten. Sind die drei Ströme einander gleich, dann wird

$$H_1 = H_2 = H_3 = H.$$

Näherungsweise lassen sich auf diese drei Magnetfelder die Regeln des Kräfteparallelogrammes anwenden, nach welchen man das resultierende Feld erhält, wenn man die Summe der Projektionen der Komponentfelder auf zwei aufeinander senkrechte Achsen bildet, und aus den so erhaltenen Werten die Resultierende berechnet. Die resultierende Feldstärke ergibt sich dann bei der graphischen Behandlung als die Hypothenuse eines rechtwinkeligen Dreieckes.

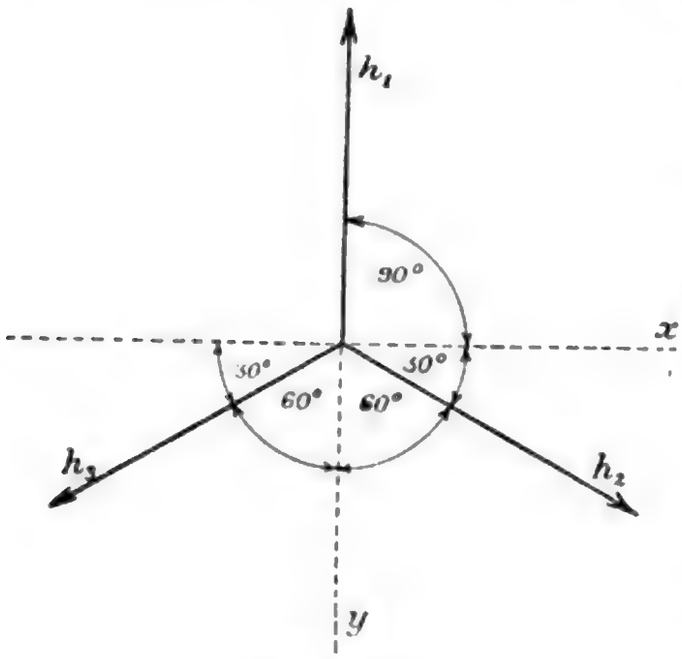


Fig. 54.

Die Phasenverhältnisse sind in Fig. 54 graphisch dargestellt. In einem gegebenen Zeitpunkte werden die auf die x-Achse gefällten Projektionen

$$h_1 = 0$$

$$h_2 \cos 30^0 = H \cos 30^0 \sin (\omega t + 120^0)$$

$$-h_3 \cos 30^0 = -H \cos 30^0 \sin (\omega t + 240^0).$$

Die Summe dieser Projektionen aber:

$$X = h_2 \cos 30^0 - h_3 \cos 30^0 = H \cos 30^0 (\sin [\omega t + 120^0 - \sin [\omega t + 240^0]).$$

Nachdem aber:

$$\sin (\omega t + 120^0) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t - \frac{1}{2} \sin \omega t$$

und

Digitized by Google

$$\sin(\omega t + 240^0) = -\left(\frac{1}{2}\sin\omega t + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\omega t\right)$$

folglich

$$\sin(\omega t + 120^0) - \sin(\omega t + 240^0) = \sqrt{3}\cos\omega t.$$

Da ferner

$$H\cos 30^0 = \frac{\sqrt{3}}{2}H$$

wird

$$X = \frac{3}{2}H\cos\omega t.$$

Die Summe der Projektionen auf die y-Achse muß auch berechnet werden, und zwar wird:

$$h_1 = H\sin\omega t$$

$$-h_2\cos 60^0 = -H\cos 60^0\sin(\omega t + 120^0)$$

$$-h_3\cos 60^0 = -H\cos 60^0\sin(\omega t + 240^0).$$

Die Summe:

$$Y = H\sin\omega t - H\cos 60^0\sin(\omega t + 120^0) - H\cos 60^0\sin(\omega t + 240^0)$$

oder

$$Y = H(\sin\omega t - \cos 60^0[\sin(\omega t + 120^0) + \sin(\omega t + 240^0)]).$$

Nach obigen Resultaten ist aber

$$\sin(\omega t + 120^0) + \sin(\omega t + 240^0) = -\sin\omega t$$

und

$$Y = H(\sin\omega t + \cos 60^0\sin\omega t).$$

Da aber

$$\cos 60^0 = \frac{1}{2}$$

wird

$$Y = H\,(sin\,\omega\,t + \tfrac{1}{2}\,sin\,\omega\,t)$$

$$Y = \frac{3}{2}\,H\,sin\,\omega\,t.$$

Die resultierende Feldstärke erhält man, wenn man die Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate der Werte X und Y zieht, also

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\,H\,cos\,\omega\,t\right)^2 + \left(\frac{3}{2}\,H\,sin\,\omega\,t\right)^2}$$

oder

$$R = \frac{3}{2}\,H.$$

Die oben angegebene Bedingung angenommen, daß nämlich auf die Magnetfelder die Regeln des Kräfteparallelogrammes anwendbar sind, ist das Ergebnis, daß das resultierende Feld konstant und unabhängig von der Zeit, mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\,\pi\,\nu$ rotiert, wo ν die Periodenzahl bedeutet.

In der Wirklichkeit ist dies aber nicht der Fall, denn das resultierende Feld pulsiert, wenn auch nicht in dem Maße, wie beim Zweiphasenstrom. Diese Pulsation des Feldes wirkt hemmend auf die Bewegung eines in diesem Felde rotierenden Ankers, weshalb man bei Mehrphasenmotoren danach trachten muß, daß das Drehfeld möglichst konstant sei, d. h. daß möglichst jene Verhältnisse auftreten, welche bei der Rotation eines mit Gleichstrom gespeisten Elektromagnets vorherrschen. Die Kraftlinienzahl soll konstant sein und sie sollen mit konstanter Geschwindigkeit rotieren.

Diese letzte Bedingung läßt sich leicht erfüllen, wenn nur die Periodenzahl des Wechselstromes konstant bleibt. Die Pulsation des Feldes wird um so kleiner, d. h. die resultierende Kraft-

linienzahl um so konstanter, je größer die Phasenzahl des zugeführten Wechselstromes ist.

Der Vermehrung der Phasenzahl steht die anzuwendende Leiterzahl hindernd im Wege, doch wir werden sehen, daß schon der Dreiphasenstrom ausreicht, um ein praktisch genügend konstantes rotierendes Feld zu erzeugen.

Ist ein mit einer in sich geschlossenen Wicklung versehener Anker im magnetischen Felde eines einphasigen Wechselstromes, dann werden in seiner Wicklung Induktionserscheinungen auftreten, es entsteht ein induzierter Wechselstrom mit derselben Periodenzahl als der induzierende Strom. Genannter induzierter Strom sucht den Anker in seiner Ruhelage festzuhalten, will man daher den Anker bewegen, dann muß man der hemmenden Wirkung entsprechend eine gewisse Arbeit leisten. Dieser Wechselstrom wirkt demnach bremsend.

Bei pulsierenden Mehrphasenfeldern entstehen ähnliche Erscheinungen. Der Mehrphasenstrom induziert in der kurzgeschlossenen Wicklung des Ankers Mehrphasenströme, welche mit den induzierenden Strömen zusammen ein Drehmoment ausüben, die den Anker in Rotation versetzen. Die Geschwindigkeit nimmt dabei immer mehr zu, bis der Anker nahezu synchron läuft.

Die Pulsationen des Feldes wirken nur bei einer gewissen Geschwindigkeit treibend auf den Anker, bei anderen Geschwindigkeiten haben sie eine bremsende Wirkung, da die durch sie hervorgerufenen induzierten Ströme magnetische Felder hervorbringen, welche nicht in der richtigen Lage zum rotierenden Felde liegen. Je größer die Pulsation, desto größer diese brennende Wirkung, bei Zweiphasenstrom wird sie daher besonders stark hervortreten, nachdem hier die Pulsation des Feldes 41,4% des Mindestwertes beträgt, wie dies im vorigen Kapitel gezeigt wurde.

Die Momentwerte der Ampèrewindungszahlen hängen von den jeweiligen Momentwerten der Stromstärken und der Windungszahl der Bewicklung ab. Die Stromstärken in einem gegebenen Zeitpunkte sind bei Dreiphasenstrom entgegengesetzten Vorzeichens, doch sind bei ihren magnetischen Wirkungen ihre absoluten Werte in Betracht zu ziehen, da die Richtung des Stromes nur auf die Lage des resultierenden Feldes, jedoch nicht auch auf ihre Intensität von Einfluß ist.

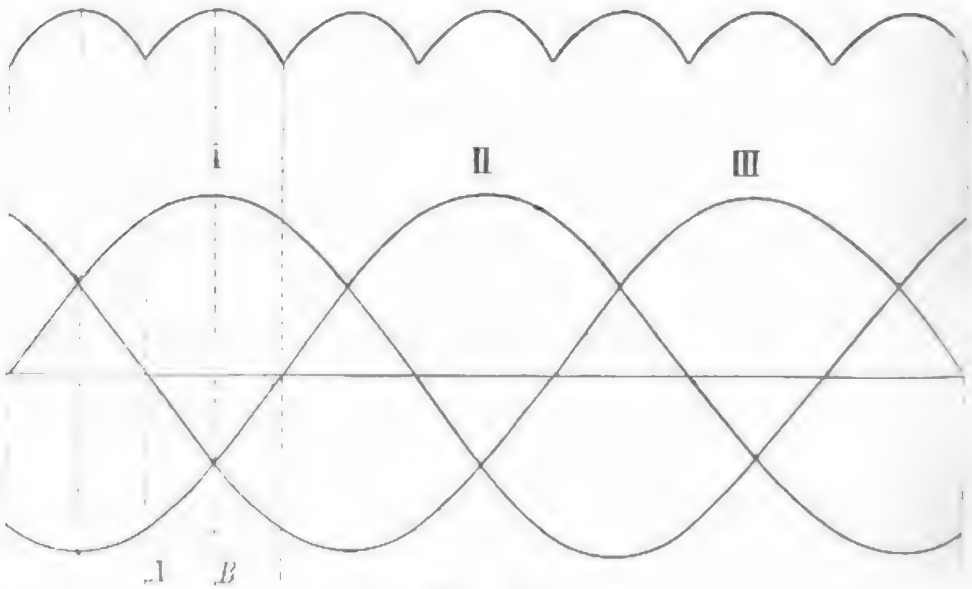


Fig. 55.

Betrachten wir den Verlauf des dreiphasigen Wechselstromes (Fig. 55), dann sehen wir, daß die Unterschiede in den Summen der Momentwerte nicht mehr so groß als bei Zweiphasenstrom sind, folglich können auch die Pulsationen des rotierenden Feldes keine so großen sein, als sie bei letzterem waren.

In jenem Zeitpunkte, wo einer der drei Ströme Null ist, sind die beiden anderen gleich groß, nur entgegengesetzt gerichtet. Im Zeitpunkte A ist

$$i_3 = \emptyset$$

und

$$i_1 = J \sin 60^0$$

$$i_2 = J \sin 120^0.$$

Oder da

$$\sin 60^0 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

und

$$\sin 120^0 = \sin 60^0 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

werden die durch die Ströme i_1 und i_2 hervorgerufenen magnetischen Felder den $\frac{\sqrt{3}}{2}$-fachen Wert des durch den Maximalstrom erzeugten Feldes haben. Das resultierende Feld in diesem Zeitpunkte wird also das

$$\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}$$

fache jenes Feldes sein, welches ein Strom durch seinen Maximalwert in denselben Windungen erzeugen kann.

Nach einer Zwölftelperiode, also nach 30^0 Phasenunterschied von A, in dem Zeitpunkte B sind die Verhältnisse schon wesentlich andere. Jetzt haben nämlich alle drei Ströme gewisse Werte, keiner ist Null, und dementsprechend wird auch das resultierende Feld vom obigen verschieden sein.

In der Phase B sind die Momentwerte der drei Ströme folgende:

$$i_1 = J \sin 90^0$$

$$i_2 = J \sin 150^0$$

und

$$i_3 = J \sin 30^0.$$

Oder da

$$sin\, 90^0 = 1\,;\ sin\, 150^0 = sin\, 30^0 = \frac{1}{2}$$

wird

$$i_1 = J$$

$$i_2 = \frac{J}{2}$$

$$i_3 = \frac{J}{2}$$

und das resultierende Feld durch die Summe dieser drei Ströme, also durch

$$J + \frac{J}{2} + \frac{J}{2} = 2\,J$$

erzeugt. Das magnetische Feld ist also in diesem Zeitpunkte das Doppelte jenes, welches durch den Maximalstrom in denselben Windungen hervorgerufen werden würde.

Das resultierende Feld pulsiert demnach bei Dreiphasenstrom während einer Zwölftelperiode zwischen den Werten $\sqrt{3} = 1{,}732$ und 2, und dementsprechend ist die Schwankung des Feldes zirka 15% gegenüber 41,4% beim Zweiphasenstrom.

Diese Pulsation des Drehfeldes legt keine Hindernisse in den Weg der praktischen Anwendung der Dreiphasenmotoren, denn wie wir beim diesbezüglichen Kapitel sehen werden, dürfen bei kleineren Periodenzahlen ohne Beeinträchtigung des Wirkungsgrades die magnetischen Beanspruchungen der Eisenmassen größer genommen werden, welche den Nachteilen der Pulsation des Drehfeldes günstig entgegenwirken. Außerdem ist die Möglichkeit der Anwendung von nur drei Außenleitern ein solcher Vorzug, welcher die Vermehrung der Phasenzahl um so mehr unnötig macht,

weil auch bei größerer Phasenzahl Pulsationen auftreten, zwar in schwächerem Maße als beim Drehstrom, jedoch ist die benötigte Anzahl der Leitungen größer als drei, welcher Umstand den Vorzug der minderen Pulsation teilweise aufhebt.

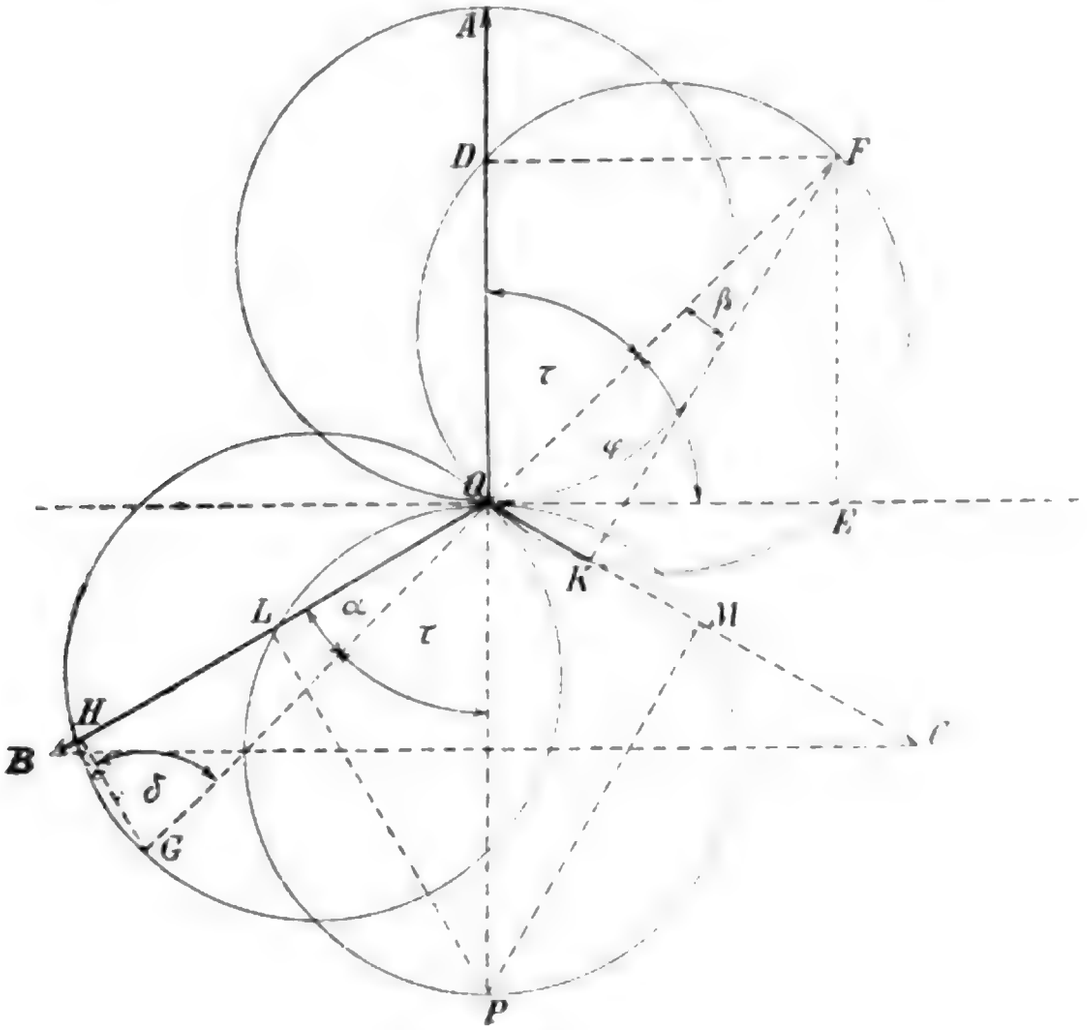


Fig. 56.

Die Pulsation des Drehfeldes ist für Dreiphasenstrom im oberen Teile der Fig. 55 graphisch dargestellt.

Durch die geschlossene und offene Verkettung der dreiphasigen Wechselströme läßt sich erreichen, daß zur Fortleitung desselben nur drei Leiter genügen. Die Möglichkeit dieser Schaltung geht aus dem bereits abgeleiteten Zusammenhang der Ströme, beziehungsweise Spannungen hervor, wonach für

jeden Zeitpunkt die algebraische Summe dieser Momentwerte Null ist:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

und

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0.$$

Die Richtigkeit dieses Zusammenhanges läßt sich in übersichtlicher Weise auch mit folgender einfachen Vorrichtung beweisen.

Das Prinzip dieser Vorrichtung beruht auf folgendem:

Seien in Fig. 56 OA, OB und OC die Vektoren der Spannungen, beziehungsweise der Stromstärken im dreiphasigen Wechselstromsystem. Diese bilden miteinander die Phasenwinkel von 120^0. Es ist nun mit Hilfe dieses Diagrammes zu beweisen, daß die algebraische Summe der Momentwerte

$$i_1 = J \sin \varphi$$

$$i_2 = J \sin (\varphi + 120^0)$$

$$i_3 = J \sin (\varphi + 240^0)$$

gleich Null ist.

Schlagen wir zwei einander in der Abscissenachse berührende Kreise mit dem Halbmesser $\frac{J}{2}$, so wird, wie aus der Figur ersichtlich, in diesem Zeitpunkte

$$i_1 = \overline{OA} \sin 90^0 = \overline{OA} = J.$$

Ferner

$$i_2 = \overline{ON} = \overline{OB} \sin (120^0 + 90^0)$$

$$i_2 = \overline{OL}$$

da die Dreiecke ONB und OLP kongruent sind.

Nachdem

$$\sin (120^0 + 90^0) = -\frac{1}{2} \text{ und } \overline{OB} = J$$

wird

$$i_2 = -\frac{1}{2} J.$$

In derselben Weise ist dann

$$i_3 = -\frac{1}{2} J$$

nachdem jetzt die Kongruenz zwischen den Dreiecken ONC und OMP besteht.

Für diese Lage der Vektoren wird somit tatsächlich

$$i_1 + i_2 + i_3 = J - \frac{J}{2} - \frac{J}{2} = 0.$$

Bedeuten OA, OB und OC Spannungsvektoren, dann wird

$$e_1 + e_2 + e_3 = E - \frac{E}{2} - \frac{E}{2} = 0$$

ebenfalls Null sein.

Für jede andere Lage der Vektoren lassen sich nun mit einer Hilfskonstruktion die Momentwerte bilden, die algebraische Summe dieser wird auch immer Null werden.

Denken wir uns die genannten Vektoren stillstehend, dafür aber die zwei früher erwähnten Kreise um den Koordinatenmittelpunkt rotierend. Betrachten wir den Fall, in welchem die gemeinsame Achse FG mit der Abscissenachse den Winkel φ bildet, und nehmen wir an, daß alle Sehnen des oberen Kreises negative, jene des unteren aber positive Werte bedeuten.

Es wird unter diesen Umständen

$$i_1 = \overline{OD} = \overline{FE} = \overline{OF} \sin \varphi$$

oder da

$$OF = OA = J$$

$$i_1 = -J \sin \varphi.$$

OD ist jene Sehne des oberen Kreises, welche im verdrehten Kreise durch den Vektor OA gebildet wird.

Es können im Diagramm die zwei Kreise feststehend und die Vektoren als drehend betrachtet werden, da diese beiden Bewegungen relative sind. Es ist also das Resultat in beiden Fällen dasselbe, nur muß dann als Anfangslage der Vektoren die positive Hälfte der Abscissenachse betrachtet werden. In diesem Falle wird dann der Momentwert der zweiten Stromstärke

$$i_2 = J \sin(\varphi + 120^0)$$

oder auf den unteren Kreis bezogen:

$$i_2 = \overline{OG} \sin\delta = J \sin\delta.$$

Aus dem Dreiecke OHG ist

$$\delta = 180^0 - 90^0 - \alpha$$

und wenn

$$\psi = 90^0 - \varphi$$

wird:

$$\alpha = 60^0 - \psi$$

und

$$\delta = 180^0 - 90^0 - 60^0 + \psi$$

oder

$$\delta = 120^0 - \varphi$$

und

$$OH = OG \sin\delta = J \sin(\varphi + 120^0) = i_2.$$

Für den dritten Momentwert endlich wird auf Grund obiger Betrachtungen

$$i_3 = OK = OF \sin\beta.$$

Aus dem rechtwinkeligen Dreieck FOK ist

$$\beta = 180^0 - 90^0 - (\varphi + 30^0)$$

$$\beta = 60^0 - \varphi$$

und

$$i_3 = OF \sin(60^0 - \varphi) = J \sin(60^0 - \varphi).$$

Nachdem aber

$$\sin(60^0 - \varphi) = \sin 60 \cos\varphi - \cos 60 \sin\varphi$$

und

$$\sin(240^0 + \varphi) = \sin 240 \cos\varphi + \cos 240 \sin\varphi$$

ferner

$$\sin 240^0 = -\sin 60$$

$$\cos 240^0 = -\cos 60^0$$

wird

$$\sin(60 - \varphi) = -\sin(240^0 + \varphi)$$

daher

$$i_3 = -J \sin(\varphi + 240^0).$$

Die Summe der so erhaltenen drei Momentwerte:

$$i_1 + i_2 + i_3 = -J \sin\varphi + J \sin(\varphi + 120) - J \sin(\varphi + 240) = 0$$

d. h. bildet man die Summe der Sehnen OD, OH und OK und zieht in Betracht, daß nach der eingangs erwähnten Bedingung die Sehnen des oberen Kreises mit negativen Vorzeichen zu nehmen sind, dann ist die Länge OH gleich mit der Summe der negativen Sehnen OD und OK und es wird

$$OD + OH + OK = 0.$$

Die erwähnte Vorrichtung zum Demonstrieren dieses Zusammenhanges läßt sich nun folgendermaßen zusammenstellen.

Man schneidet aus Karton zwei gleiche Scheiben und zeichnet auf eine zwei Kreise x, y, deren Durchmesser in eine Gerade fallen und die sich berühren. Die zwei Kreise sind verschiedenfarbig ausgeführt.

302755

Die zweite Scheibe erhält drei voneinander um je 120° abstehende radiale Ausschnitte *A*, *B* und *C*. Diese Scheibe wird auf die erstere gelegt. Dreht man nun die untere Scheibe, dann erscheinen die drei Ausschnitte in verschiedenen Farben, je nachdem die unteren Kreise ihre Lagen ändern.

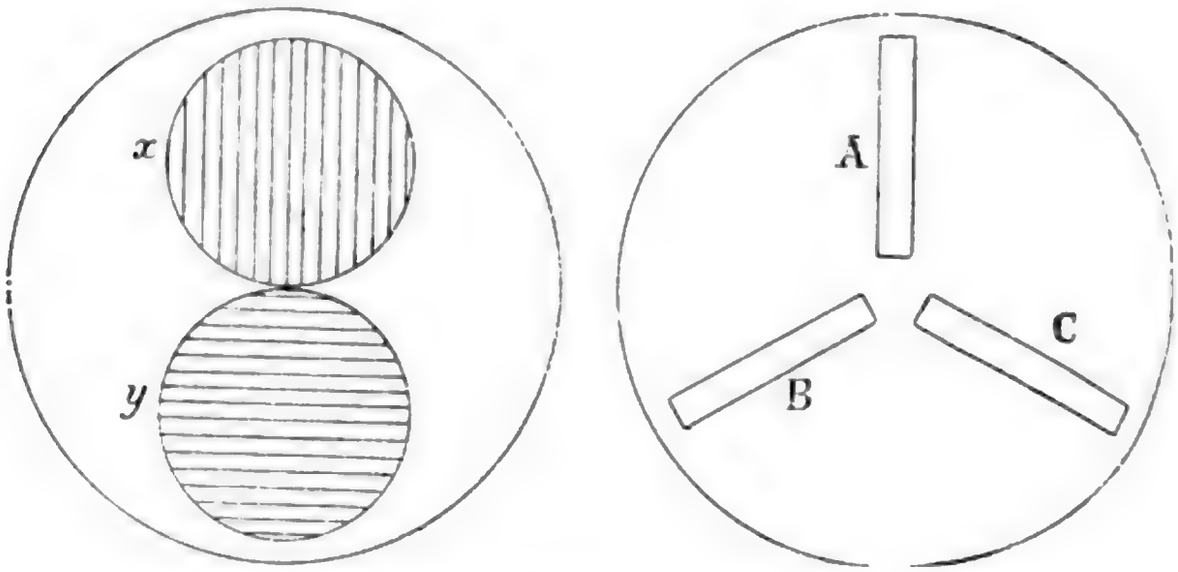


Fig. 57.

Die farbigen Teile der Ausschnitte sind die im Diagramm erwähnten Sehnen der zwei Kreise. wenn man also die Sehnen des einen Kreises, d. h. wenn man die gleichfarbigen Teile addiert, dann ist ihre Summe gleich mit der dritten Sehne, beziehungsweise mit der Länge des andersfarbig erscheinenden Teiles des entsprechenden Ausschnittes.

Digitized by Google

IV. Kapitel.

Verschiedene Mehrphasenstromsysteme.

Wir haben uns bisher mit zwei-, beziehungsweise vier- und dreiphasigem Wechselstrom befaßt, nun wollen wir die fünf-, sechs-, acht-, zwölf- und im allgemeinen n-phasigen Wechselstromsysteme näher untersuchen. Für die praktische Anwendung

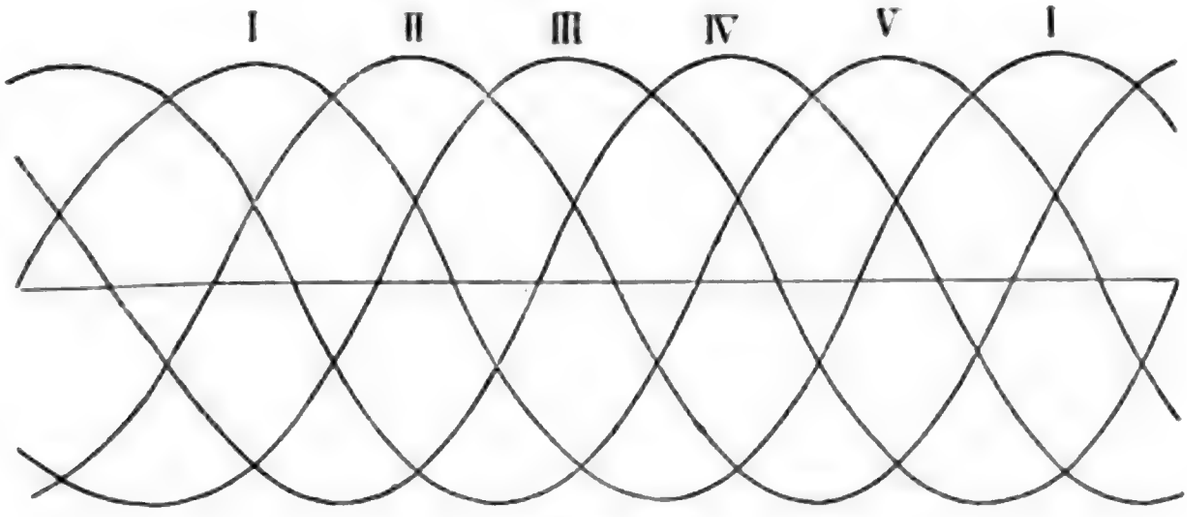


Fig. 58.

der mehrphasigen Ströme ist zwar nur der dreiphasige Wechselstrom von Bedeutung, immerhin ist die Behandlung der nun zu beschreibenden Wechselstromsysteme nötig, um von den verschiedenen Verhältnissen in den anderen mehrphasigen Systemen ein klares Bild zu haben.

Der fünfphasige Wechselstrom.

Beim fünfphasigen Wechselstrom bilden fünf gewöhnliche Wechselströme ein System. Diese Ströme sind gegeneinander zeitlich um eine Fünftelperiode oder 72^0 in der Phase verschoben (Fig. 58) und alle haben gleiche Amplituden, also gleiche Maximalwerte. Bedeuten die Kurven I—I^V Stromwellen, dann ist für einen bestimmten Zeitpunkt:

$$i_1 = J \sin \omega t$$

$$i_2 = J \sin (\omega t + 72)$$

$$i_3 = J \sin (\omega t + 144)$$

$$i_4 = J \sin (\omega t + 216)$$

$$i_5 = J \sin (\omega t + 288).$$

Benutzen wir die in Fig. 18 abgebildete Vorrichtung zur Erzeugung des fünfphasigen Stromes, dann erhält der Eisenring fünf voneinander um je 72^0 abstehende Spulen, deren Anfangs- und Endpunkte mit je einer Außenleitung verbunden werden können. In dieser Weise haben wir zehn Leiter nötig, doch läßt sich diese Zahl vermindern, wenn man ähnliche Schaltungen, wie bei dem dreiphasigen Wechselstrome benutzt. Dementsprechend unterscheidet man geschlossene und offene Verkettung des Fünfphasenstromes, im ersten Falle genügen fünf. im zweiten höchstens sechs Außenleiter, doch läßt sich auch bei letzterem ein Leiter ersparen, wenn man vom neutralen Punkte keinen Leiter abzweigt.

Während bei zehn Leitungen in jeder Phase die Stromstärke und die Spannung von den anderen Phasen nicht beeinflußt wird, sind die Verhältnisse bei Verkettung wesentlich andere. Bei geschlossener Verkettung ist die Stromstärke in den Leitern

größer als in einem Windungsteile, die Spannung bleibt aber unverändert, d. h. dieselbe, als sie bei zehn Leitungen wäre. Bei der offenen Verkettung dagegen entsteht zwischen den Hauptleitern eine resultierende Spannung, die Stromstärke in einer Leitung ist mit der in einem Windungsteile fließenden gleich.

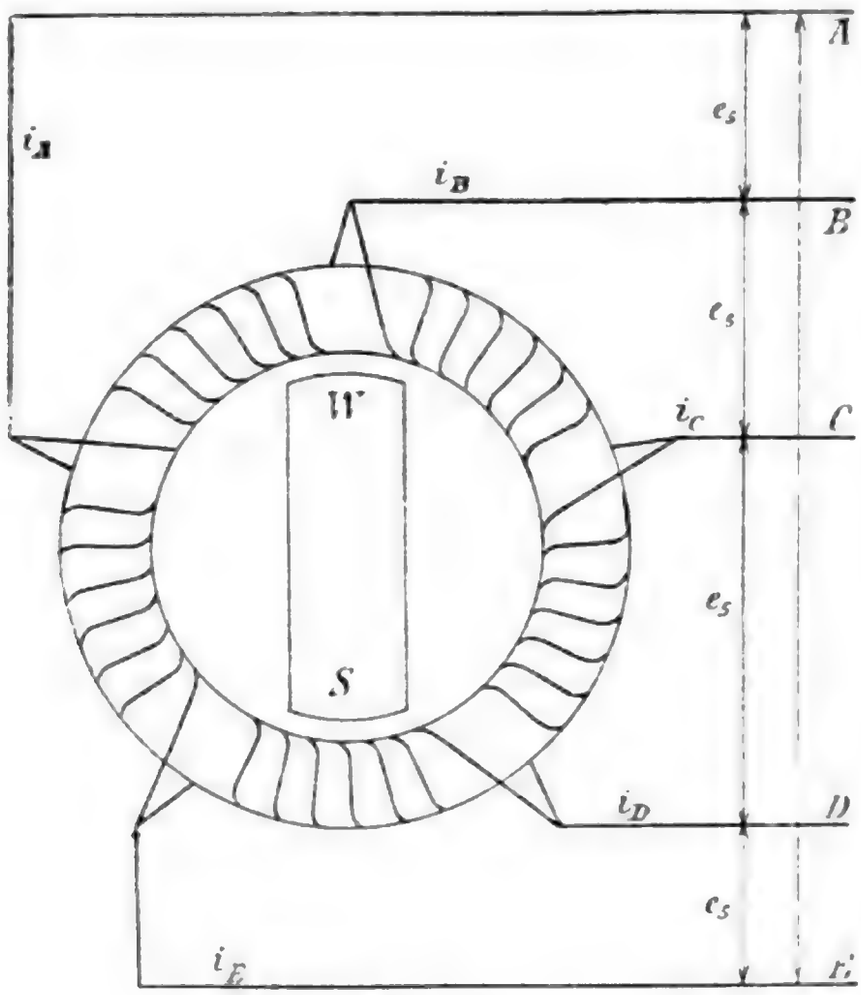


Fig. 59.

Fig. 59 zeigt die Schaltungsweise bei geschlossener Verkettung der fünfphasigen Wechselströme. Zwischen den Leitungen $A\,B\,C\,D\,E$ herrschen die Spannungsdifferenzen e_5, welche mit den Spannungsdifferenzen zwischen den Endpunkten einer Fünftelwicklung gleich sind. In den Wicklungen fließen die um je 72^0 in der Phase verschobenen Ströme i_5, während in die Außenleitungen

die resultierenden Ströme i_A, i_B, i_C, i_D und i_E fließen.

Um den Wert des Leitungsstromes zu kennen, müssen wir die für die geometrische Addition giltige Gleichung aufstellen.

i_A ergibt sich als die Resultante zweier Stromstärken i_5, welche einander entgegengesetzt gerichtet sind. Die Vektorgleichung wird also lauten:

$$i_A = + i_5 (+) - i_5.$$

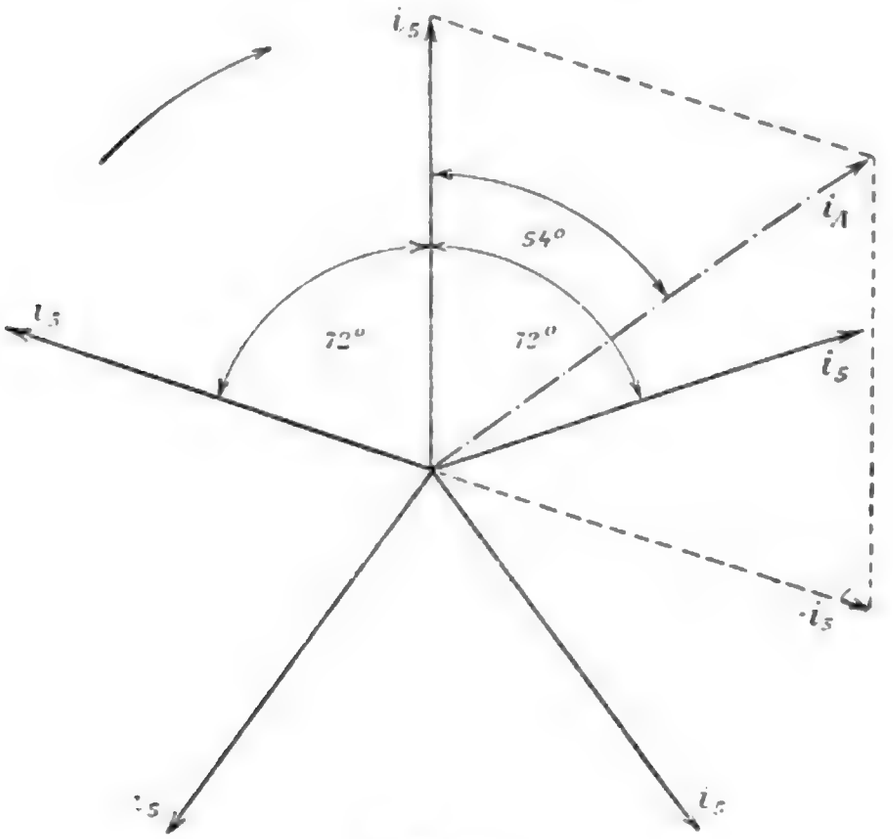


Fig. 60.

In Fig. 60 sind die fünf Stromvektoren in ihrer relativen Lage dargestellt. Jeder Vektor bildet mit dem nachfolgenden den Phasenwinkel von 72^0, so daß $+ i_5$ und $- i_5$ den Winkel 108^0 einschließen. Die resultierende Stromstärke ergibt sich nun aus einer Kräfteparallelogramm-Konstruktion, und wie auch aus der Figur ersichtlich, eilt der Vektor derselben der Komponentstrom-

stärke in der Phase um 54^0 vor. Ihr Wert ergibt sich aus der Gleichung:

$$i_A = \sqrt{(+i_5)^2 + (+i_5)^2 - 2\,(+i_5)\,(+i_5)\cos 72^0}$$

oder

$$i_A = \sqrt{2\,i_5^2 - 2\,i_5^2 \cos 72^0}$$

für

$$\cos 72^0 = 0{,}309$$

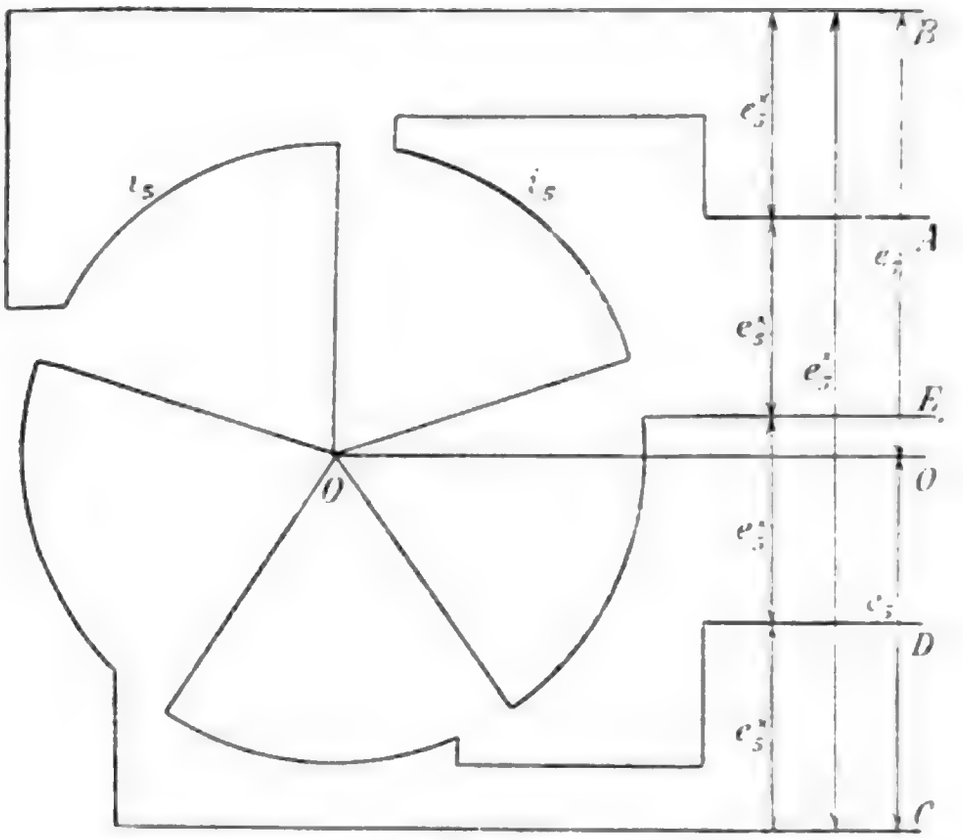


Fig. 61.

eingesetzt, wird

$$i_A = \sqrt{1{,}382\,i_5} = 1{,}176\,i_5$$

d. h. die resultierende Stromstärke ist 1,176-mal größer als der Zweigstrom in einer Phase.

Bei der offenen Verkettung (Fig. 61) sind alle Enden der fünf Wicklungsteile in einem Punkte vereinigt, während die Anfangspunkte mit den Außenleitern verbunden werden. Der gemein-

same Punkt ist der neutrale Punkt des Stromsystems, dieser kann auch mit einem Leiter, dem Ausgleichsleiter verbunden werden. Die Konsumenten werden dann entweder zwischen zwei Hauptleiter oder einem Haupt- und dem Ausgleichsleiter geschaltet. Diese letztere Schaltung ist besonders dann zu empfehlen, wenn die einzelnen Phasen ungleichmäßig belastet sind.

Nachdem jetzt mit jedem Außenleiter ein Wicklungsteil verbunden ist, kann in denselben nur jene Stromstärke auftreten, welche in den entsprechenden Wicklungsteil fließt, daher wird

$$i_A = i_B = \ldots = i_E = i_5$$

vorausgesetzt, daß die Belastungen der Phasen gleich sind und überall die Leistungsfaktoren denselben Wert besitzen. In diesem Falle fließt in der Leitung O kein Strom. Bei ungleichmäßigen Belastungen wird in letzterem ein Strom fließen, dessen Stärke von den Belastungsdifferenzen der einzelnen Phasen abhängt.

Je zwei Wicklungsteile sind nacheinander geschaltet, weshalb eine resultierende verkettete Spannung auftritt, deren Komponenten die früher erwähnten e_5 Spannungen sind. Bezeichnen wir die verkettete Spannung mit $e_5^{\times}$, dann wird

$$e_5^{\times} = (+e_5) + (-e_5)$$

oder in ähnlicher Weise wie bei den Stromstärken

$$e_5^{\times} = \sqrt{(+e_5)^2 + (+e_5)^2 - 2(+e_5)(+e_5)\cos 72^0}$$

$$e_5^{\times} = 1{,}176\, e_5.$$

Die verkettete Spannung ist demnach mit 17,6% größer als die Sternspannung bei offener Verkettung des fünfphasigen Wechselstromes. Die

Digitized by Google

resultierende Spannung eilt der Komponentspannung in der Phase um 54^0 vor.

Das magnetische Drehfeld des fünfphasigen Wechselstromes ist gleichmäßiger als das des Dreiphasenstromes, die Pulsationen sind geringer, da die Stromwellen dichter einander folgen als bei letzteren. Die Fünfphasenmotoren sind daher im Betriebe besser, doch der Umstand, daß wenigstens fünf Leitungen nötig sind, ist nachteilig, besonders bei Kraftübertragungen, wo gewöhnlich nach großen Entfernungen bedeutende Energiemengen zu transportieren sind.

Eine Gleichstrommaschine kann leicht zur Erzeugung fünfphasiger Wechselströme hergerichtet werden, da man nur fünf solche Punkte der Wicklung mit Schleifringen verbinden muß, welche am Armaturumfang oder im Wicklungsschema gleichmäßig verteilt sind. Am einfachsten läßt sich dies bei einer gewöhnlichen Ringarmatur durchführen, bei Trommelankern ist bei gleichmäßiger Wicklung nur nötig, fünf Kollektorsegmente mit Schleifringen zu verbinden, welche zwischen aufeinander folgenden verschiedenen Bürsten in gleichen Abständen aufeinander folgen. Bei zweipoliger Maschine würden demnach jene Segmente mit Schleifringen verbunden sein, welche voneinander an der Peripherie des Kollektors um den Winkel von $\frac{180^0}{5} = 36^0$ abstehen.

Sehen wir nun die Leistungsverhältnisse bei einer zweipoligen Maschine, welche zur Abgabe von Gleichstrom und fünfphasigem Wechselstrom eingerichtet ist. Bei der Berechnung nehmen wir an, daß der Generator einmal nur Gleichstrom, dann wieder nur Fünfphasenstrom liefert, und zugleich werden wir jenen Zusammenhang feststellen, der bei gleichbleibender Tourenzahl und magnetischem Felde zwischen der Gleichstrom- und der Wechselstromspannung besteht.

Digitized by Google

Sei die Gleichstromspannung an den Bürsten der Maschine e, die Stromstärke im Gleichstromkreise i.

Bei geschlossener Verkettung ist die Leistung des Fünfphasenstromes in einer Phase bei dem Leistungsfaktor $\cos\varphi$

$$w = e_5\, i_5 \cos\varphi$$

und die Gesamtleistung

$$W_5 = 5\, w = 5\, e_5\, i_5 \cos\varphi.$$

Nimmt man statt dem Zweigstrom den Leitungsstrom in Berechnung, dann wird, nachdem

$$i_A = 1{,}176\, i_5$$

$$W_5 = \frac{5}{1{,}176}\, e_5\, i_A \cos\varphi = 4{,}25\, e_5\, i_A \cos\varphi$$

d. h. bei gleicher Belastung aller fünf Stromkreise ist die Gesamtleistung des Fünfphasenstromes das 4,25-fache der Leistung in einer Phase. In solchem Falle ist demnach genügend die Leistung nur in einer Phase zu messen und das Ergebnis dann mit 4,25 zu multiplizieren.

Bei offener Verkettung war

$$i_A = i_5$$

jedoch

$$e_5^{\times} = 1{,}176\, e_5.$$

Die Leistung des einen Zweiges ist

$$w^{\times} = e_5\, i_A \cos\varphi.$$

Die Gesamtleistung:

$$W_5^{\times} = 5\, e_5\, i_A \cos\varphi.$$

Den Wert der verketteten Spannung eingesetzt, wird:

$$W_5 = \frac{5}{1{,}176} e_5^{\times} i_A \cos\varphi = 4{,}25\, e_5^{\times} i_A \cos\varphi.$$

Das Resultat ist dasselbe wie zuvor. Es ist immer das 4,25-fache Produkt der Phasenspannung mit dem Leitungsstrom und dem als für alle Phasen konstant angenommenen Leistungsfaktor zu bilden.

Der Zusammenhang zwischen der Gleichstrom- und der Fünfphasenspannung ergibt sich nach der auf Seite 81 angegebenen Gleichung als

$$e_5 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin\frac{\pi}{5} e$$

oder, da

$$\sin\frac{\pi}{5} = \sin 36^0 = 0{,}588$$

wird

$$e_5 = \frac{0{,}588}{\sqrt{2}} e = 0{,}416\, e.$$

Für die offene Verkettung ist

$$e_5^{\times} = 1{,}176\, e_5 = 1{,}176 \,.\, 0{,}416\, e$$

$$e_5^{\times} = 0{,}489\, e.$$

Wie verhalten sich die Stromstärken? Die Beanspruchung der Armatur soll dieselbe bleiben sowohl bei Lieferung des Gleich- als auch des Fünfphasenstromes. Die Erwärmung muß also in beiden Fällen dieselbe sein, was nur so erreicht werden kann, wenn der Zweigstrom in seinem Effektivwerte gleich mit dem die Armaturdrähte durchfließenden Gleichstrom ist.

Unsere Maschine ist zweipolig, folglich führt die Armatur in einer Wicklungshälfte den Strom $\frac{i}{2}$. Es muß also

$$i_5 = \frac{i}{2}$$

oder bei geschlossener Verkettung:

$$i_A = 1{,}176\, i_5 = \frac{1{,}176}{2}\, i = 0{,}588\, i$$

sein.

Nun können wir schon den Zusammenhang b geschlossener Verkettung zwischen beiden Lei tungen bestimmen, und zwar wird bei $\cos\varphi = 1$:

$$W_5 = 4{,}25\, e_5\, i_A = 4{,}25 \,.\, 0{,}416 \,.\, 0{,}588\, i\, e$$

$$W_5 = 1{,}04\, i\, e$$

$$W_5 = 1{,}04\, W$$

wo W die maximale Gleichstromleistung bedeute

Die letzte Gleichung besagt, daß die Gesam leistung des fünfphasigen Wechselstromes um 4 größer ist als die des aus derselben Armatur e zeugten Gleichstromes, gleiche Inanspruchnahm der Wicklung und im Wechselstromkreise kein Phasenverschiebung vorausgesetzt.

Für offene Verkettung ist

$$e_5^{\,x} = 1{,}176\, e_5 = 0{,}489\, e.$$

Der die Armaturdrähte durchfließende Strom

$$i_5 = i_A = \frac{i}{2}$$

im zulässigen höchsten Werte.

Die Leistung des Wechselstromes wird als

$$W_5^{\,x} = 4{.}25\, e_5^{\,x}\, i_A$$

und auf die Gleichstromleistung bezogen:

$$W_5^{\,x} = 4{,}25 \,.\, 0{,}489\, e\, 0{,}5\, i$$

$$W_5^{\,x} = 1{,}04\, e\, i = 1{,}04\, W.$$

Digitized by Google

Das Resultat ist dasselbe wie bei geschlossener Verkettung, die Schaltungsweise der Armatur hat also auf die Leistungsverhältnisse keinen Einfluß.

Sechsphasige Stromkreise.

Ein sechsphasiger Strom besteht aus sechs Wechselströmen, welche gegeneinander eine Phasendifferenz von 60° haben (Fig. 62) und dementsprechend haben wir im Vektordiagramm sechs Vektoren mit dem Phasenwinkel von 60° (Fig. 63). Die einzelnen Maximalwerte folgen einander in kurzen Interwallen, was eine große Gleichmäßigkeit

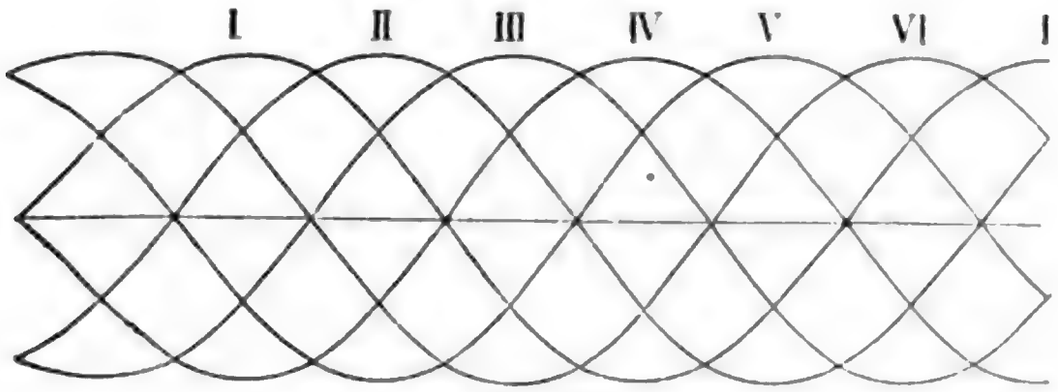


Fig. 62.

des entstehenden rotierenden magnetischen Feldes zur Folge hat.

Nun haben wir mit sechs Strömen zu tun, in einem gegebenen Zeitpunkte ist der Momentwert dieser Ströme

$$i_1 = J \sin \omega t$$

$$i_2 = J \sin (\omega t + 60^0)$$

$$i_3 = J \sin (\omega t + 120^0)$$

$$i_4 = J \sin (\omega t + 180^0)$$

$$i_5 = J \sin (\omega t + 240^0)$$

$$i_6 = J \sin (\omega t + 300^0).$$

Digitized by Google

Betrachten wir diese Gleichungen, so sehen wir, daß i_1, i_3 und i_5 dieselben Werte haben, wie die Dreiphasenströme, dasselbe steht für die Ströme i_2, i_4 und i_6 mit dem Unterschiede, daß diese gegen die früher erwähnten in der Phase um 60° verschoben sind. In diesem Sinne kann man den Sechsphasenstrom als die Kombination zweier Dreiphasenstromkreise betrachten, deren Ströme gegeneinander um den Phasenwinkel von 60° verschoben sind.

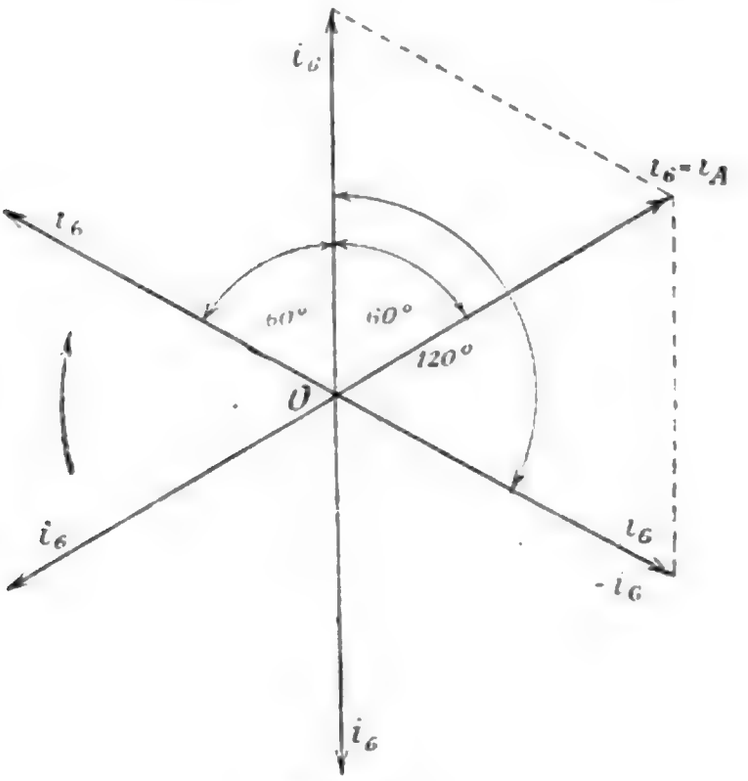


Fig. 63.

Aus den drei Strömen *I*, *II* und *III* (Fig. 62) läßt sich der Dreiphasenstrom dadurch ableiten, daß man *II* entgegengesetzt nimmt. Dies läßt sich mit geeigneter Schaltung durchführen, man muß nur die Schaltungsanordnung so wählen, daß die Richtung dieses Stromes mit jener von *II* entgegengesetzt wird. *II* kommt dann in die Lage des Stromes *V*, und tatsächlich ist aus der Figur ersichtlich, daß dann die Ströme *I*, *III* und *V* ein Dreiphasenstromsystem bilden.

Nachdem beim Sechsphasenstrome sechs Wechselströme ein System bilden und jeder Strom zwei Leitungen beansprucht, wären zwölf Leitungen zur Fortleitung dieses Mehrphasenstromes notwendig, doch läßt sich auch hier die bereits besprochene kombinierte Schaltungsweise an-

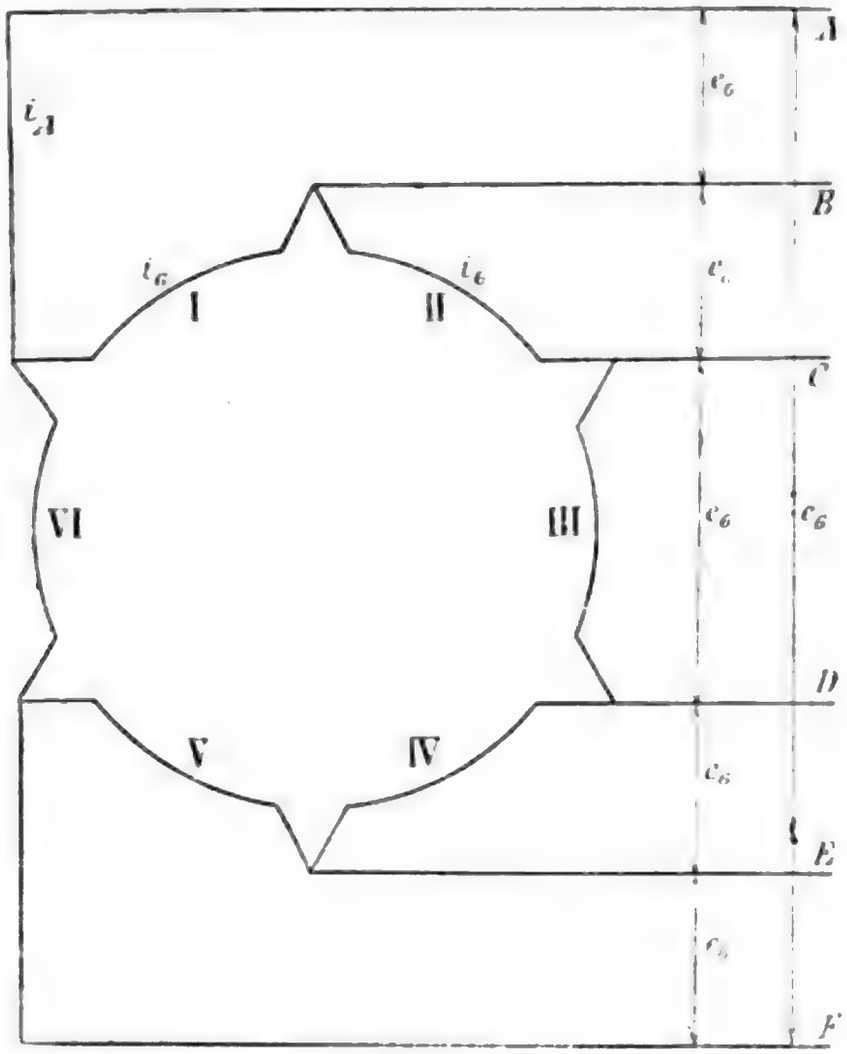


Fig. 64.

wenden, welche ermöglicht, daß zur Übertragung dieser Ströme vom Erzeuger zu den Konsumenten nur sechs Leiter genügen. Die Ströme sind dann nicht mehr unabhängig voneinander.

Man unterscheidet geschlossene und offene Verkettung des Sechsphasenstromes. Die erstere kann auch Parallel-, die letztere Serienschaltung

Digitized by Google

genannt werden, da im ersten Falle die Spannung, im zweiten aber die Stromstärke konstant bleibt.

In Fig. 64 ist die geschlossene Verkettung schematisch dargestellt. *I*, *II*, . . ., *VI* bedeuten die einzelnen Phasen des Erzeugers, in welchen die phasenverschobenen Ströme entstehen. Zwischen zwei aufeinander folgenden Abzweigpunkten tritt

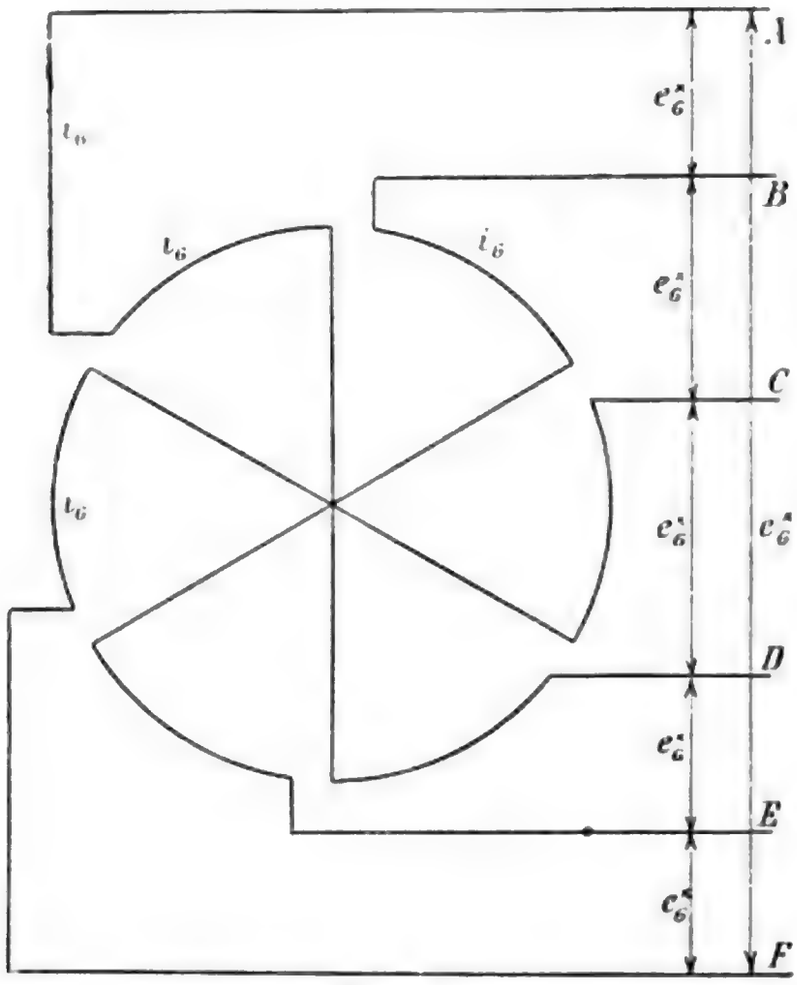


Fig. 65.

die Sechsphasenspannung e_6 auf. In den einzelnen Windungsteilen fließen die Ströme i_6, während in die Außenleitung ein resultierender Strom i_A etc. fließt.

Die Vektorgleichung des Leitungsstromes ist:

$$i_A = (+ i_6)(+)(- i_6).$$

Digitized by Google

Die Teilströme bilden miteinander den Phasenwinkel von 60°, folglich wird die Phasendifferenz zwischen $+i_6$ und $-i_6$ 120° betragen (Fig. 63).

Den resultierenden i_A Strom konstruiert, ergibt sich dieser mit dem Strome i_6 gleich, da $O\,i_6\,(-i_6)$ ein gleichseitiges Dreieck bilden. Außerdem ist

$$i_A = \sqrt{(+i_6)^2 + (-i_6)^2 - 2\,(+i_6)\,(-i_6)\cos 60^0}$$

Nachdem:

$$\cos 60^0 = \frac{1}{2}$$

wird

$$i_A = \sqrt{2\,i_6^2 - i_6^2} = \sqrt{i_6^2}$$

oder

$$i_A = i_6.$$

Wir stehen also dem interessanten Fall gegenüber, bei welchem der aus zwei Strömen resultierende Strom gleich mit einer Stromkomponente ist. Dies ist eine Eigentümlichkeit des Sechsphasenstromes und ergibt sich daraus, daß der Phasenwinkel zwischen den Stromkomponenten, aus welchen i_A entsteht, 120° beträgt. Der resultierende Strom eilt dem Komponentstrome in der Phase um 60° voraus.

Dasselbe, was bei geschlossener Verkettung auf die Stromstärken steht, ist bei offener Verkettung auf die Spannungen giltig. Die verkettete Spannung $e_6^{\times}$ resultiert aus den beiden Sternspannungen e_6 in derselben Weise wie zuvor i_A aus $+i_6$ und $-i_6$. Auch ist beim Sechsphasenstrom

$$e_6^{\times} = e_6.$$

Diese Spannung eilt der Sternspannung in der Phase um 60° vor.

Zwischen zwei Leitungen herrscht dieselbe Spannung als zwischen einer Leitung und dem

Digitized by Google

neutralen Punkte. Was also den Spannungswert anbelangt, ist gleichgiltig, ob man die Konsumenten zwischen zwei Hauptleitungen oder einer Hauptleitung und dem neutralen Leiter schaltet.

Bei offener Verkettung ist der Strom in der Haupt- und Armaturleitung derselbe wie bei geschlossener Verkettung in den Haupt- und Armaturleitungen, außerdem ist auch zwischen den auftretenden Spannungswerten bei den zwei Schaltungsweisen kein Unterschied, weshalb beide Schaltungen in bezug auf die Strom- und Spannungswerte überhaupt nicht verschieden sind.

Dies ist auch die Folge der zwischen den Wechselwerten auftretenden Phasenverschiebung von 60^0, bei allen anderen Phasendifferenzen besteht dieser Zusammenhang nicht. Nur das sechsphasige Wechselstromsystem zeigt diese eigentümlichen Verhältnisse.

Sehen wir nun die Leistungsverhältnisse bei einem Generator, der zur Erzeugung von Gleich- und Sechsphasenstrom eingerichtet ist.

Die Leistung des Gleichstromes ist bei der Klemmenspannung e und dem Strome i im äußeren Stromkreise gleich mit

$$W = e\,i.$$

Erzeugt dieselbe Maschine Sechsphasenstrom, dann ist die Leistung in einer Phase bei geschlossener Verkettung und dem Leistungsfaktor $cos\ \varphi$:

$$w = e_6\,i_6\,cos\,\varphi.$$

Die Gesamtleistung

$$W_6 = 6\,e_6\,i_6\,cos\,\varphi$$

gleichmäßige Belastung der sechs Phasen vorausgesetzt.

Nachdem $i_6 = i_A$, wird der Ausdruck der Gesamtleistung derselbe bleiben, wenn man anstatt

Digitized by Google

des Zweigstromes den Leitungsstrom in die Leistungsgleichung einsetzt. Man bekommt demnach die Gesamtleistung des Sechsphasensystems bei gleicher Belastung aller Phasen, wenn man die in einer Phase gemessene Leistung mit 6 multipliziert.

Der Zusammenhang zwischen der Sechsphasenspannung und der Gleichstromspannung ergibt sich aus der bereits benutzten Gleichung

$$e_6 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin 30^0 e$$

oder, da

$$\sin 30^0 = \frac{1}{2}$$

wird

$$e_6 = \frac{1}{2\sqrt{2}} e = 0{,}354\, e.$$

Nachdem die verkettete Spannung bei offener Verkettung mit e_6 gleich ist, wird auch:

$$e_6^{\times} = 0{,}354\, e.$$

Was die Belastung der Armaturdrähte anbelangt, wird die Erwärmung derselben dieselbe als beim Gleichstrom sein, wenn:

$$i_6 = i_A = \frac{i}{2}$$

weshalb die Gesamtleistung

$$W_6 = 6\, e_6\, i_6 = 6 \,.\, 0{,}354\, e\, 0.5\, i = 1{,}06\, e\, i$$

$$W_6 = 1{,}06\, W.$$

Für die offene Verkettung ist das Ergebnis dasselbe.

Man sieht hieraus, daß dieselbe Maschine als Sechsphasengenerator verwendet, um 6% mehr

Energie liefert als wie die Gleichstrommaschine, dieselbe Erwärmung der Maschine und keine Phasenverschiebung vorausgesetzt. Ist Phasenverschiebung vorhanden, dann sind die Leistungsverhältnisse für den Sechsphasenstrom ungünstiger.

Achtphasiger Wechselstrom.

Acht Wechselströme mit der gegenseitigen Phasenverschiebung von 45^0 bilden ein achtphasiges System (Fig. 66). Bei diesem Systeme sind die

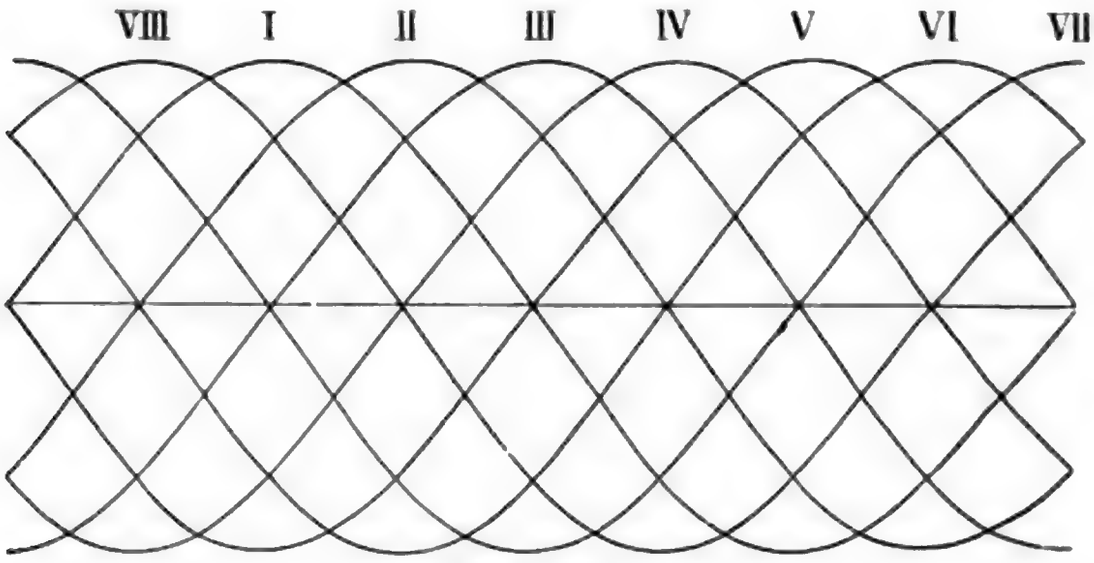


Fig. 66.

Schwankungen der Stärke des magnetischen Feldes infolge der kleinen Phasenverschiebung sehr gering, d. h. das Drehfeld ist kaum pulsierend.

Die Vektoren bilden miteinander den Phasenwinkel von 45^0 (Fig. 67), der resultierende Strom bei Parallelschaltung der Phasen ergibt sich aus den Zweigströmen $+ i_8$ und $- i_8$. Es wird demnach bei geschlossener Verkettung

$$i_A = (+ i_1)\,(+)\,(- i_8).$$

Die Stromstärke ist für die einzelnen Phasen in einem Zeitpunkte durch die Gleichungen gegeben

Digitized by Google

$$i_1 = J \sin \omega t$$

$$i_2 = J \sin (\omega t + 45^0)$$

$$i_3 = J \sin (\omega t + 90^0)$$

$$i_8 = J \sin (\omega t + 315^0).$$

$+ i_1$ und $+ i_8$ bilden miteinander den Phasenwinkel von 45^0, folglich ist der Phasenunterschied zwischen $+ i_1$ und $- i_8$

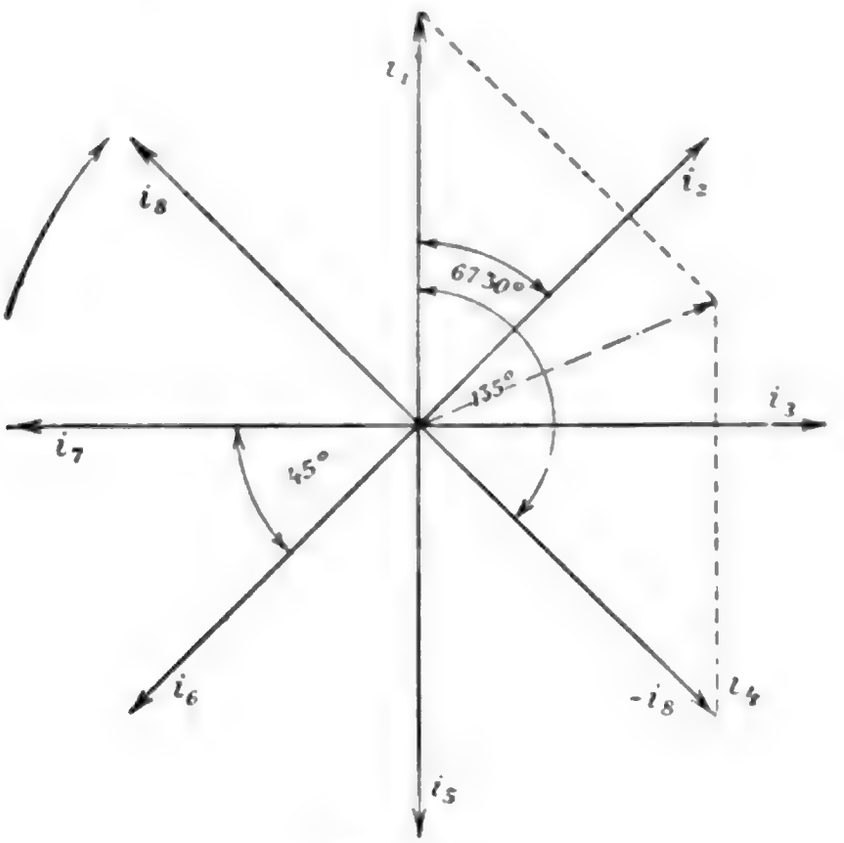


Fig. 67.

$$\varphi = 180^0 - 45^0 = 135^0$$

und der aus diesen Strömen resultierende Strom i_4 eilt zu i_1 um den Winkel

$$\varphi_1 = \frac{\varphi}{2} = \frac{135}{2} = 67^0\,30'$$

vor, da der resultierende Strom zu beiden Komponenten symmetrisch liegt.

Der Wert desselben ergibt sich aus der Gleichung

$$i_A = \sqrt{(+i_1)^2 + (-i_1)^2 - 2\,(+i_1)\,(-i_1)\cos 45^0}.$$

Da

$$\cos 45^0 = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

wird

$$i_A = \sqrt{2\,i_1^2 - \sqrt{2}\,i_1^2} = \sqrt{2 - \sqrt{2}}\,i_1$$

oder

$$i_A = 0{,}765\,i_1.$$

Dies besagt, daß der resultierende Strom bei geschlossener Verkettung kleiner als einer der Komponentströme ist, was von dem großen Phasenunterschied zwischen den Komponentströmen herrührt.

In dieser Hinsicht bildete der Sechsphasenstrom die Grenze. Ist die Phasenzahl kleiner als sechs, dann bleibt der Phasenunterschied zwischen den Strömen über 60^0 und der resultierende Strom ist größer als eine Komponente. Beim Sechsphasenstrome ist diese Phasenverschiebung 60^0, der resultierende Strom ist mit den Komponentströmen gleich. Alle anderen mehrphasigen Ströme, bei denen die Phasenzahl größer als sechs ist, haben einen Phasenunterschied, der kleiner als 60^0 ist, und demzufolge ist der resultierende Leitungsstrom kleiner als ein Zweigstrom.

Bei offener Verkettung des Achtphasenstromes ist der Leitungsstrom mit dem Zweigstrome gleich, die Spannungsdifferenz zwischen den Leitungen aber ist von der zwischen den Endpunkten eines Wicklungsteiles oder mit anderen Worten, von der zwischen einer Leitung und dem neutralen Punkte verschieden.

Digitized by Google

Der Zusammenhang dieser Spannungen ist derselbe als zuvor der Stromstärken, wenn also die Spannungsdifferenz zwischen einer Leitung und dem neutralen Punkte e_8, jene zwischen zwei Leitungen e_8' ist, dann wird

$$e_8' = 0{,}765\, e_8$$

d. h. die verkettete Spannung ist kleiner als die Sternspannung.

Untersuchen wir nun den Zusammenhang der Gleichstrom- und der Wechselstromleistung in dem Falle, wenn beide Ströme aus derselben Armatur erzeugt werden, vorausgesetzt, daß die Erwärmung der Armatur in beiden Fällen dieselbe bleibt und daß zwischen der Spannung und der Stromstärke im Wechselstromkreise keine Phasenverschiebung vorhanden ist, also daß nur Ohmsche Widerstände die Belastung bilden.

Bei der gelieferten Gleichstromstärke i im äußeren Stromkreise und der Klemmenspannung e ist die Gleichstromleistung $e\,i$ Watt.

Im Wechselstromkreise ist im allgemeinen die Leistung in einer Phase

$$w_8 = e_8\, i_8 \cos\varphi$$

da aber nach unserer Voraussetzung $\cos\varphi = 1$ wird

$$w_8 = e_8\, i_8.$$

Die Gesamtleistung daher W_8:

$$W_8 = 8\, e_8\, i_8.$$

Nach unseren bisherigen Ausführungen läßt sich die Achtphasenspannung mit Hilfe der Gleichstromspannung folgendermaßen ausdrücken:

$$e_8 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin 22^0\,30'\, e$$

oder da

$$\sin 22^0 30' = 0{,}383$$

wird

$$e_8 = \frac{0{,}383}{\sqrt{2}}\, e$$

$$e_8 = 0{,}271\, e.$$

Die Achtphasenspannung ist bei geschlossener Verkettung demnach um 72,9% kleiner als die aus derselben Armatur erzeugte Gleichstromspannung bei derselben Tourenzahl und Feldstärke.

Soll die Erwärmung der Armatur in beiden Fällen dieselbe bleiben, dann kann

$$i_8 = \frac{1}{2}\, i$$

sein höchstens, so daß die Gesamtleistung des Achtphasenstromes sich als

$$W_8 = 8 \,.\, 0{,}271\, e \,.\, 0{,}5\, i$$

ergibt, oder

$$W_8 = 1{,}084\, e\, i = 1{,}084\, W.$$

Bei geschlossener Verkettung liefert dieselbe Armatur unter den gegebenen Bedingungen um 8,4% mehr Energie, wenn sie als Achtphasenstromgenerator verwendet wird, als wenn sie Gleichstrom erzeugt.

Bei offener Verkettung der Ströme ist der Leitungsstrom mit dem Zweigstrome gleich, folglich im Maximalwerte:

$$i_A = i_8^{\times} = 0{,}5\, i.$$

Die Gesamtleistung in diesem Falle

$$W_8^{\times} = 8\, e_8\, i_8^{\times}$$

oder

$$W_8^{\times} = 8 \,.\, 0{,}271\, e \,.\, 0{,}5\, i$$

$$W_8^{\times} = 1{,}084\, W.$$

Digitized by Google

Das Ergebnis ist dasselbe wie zuvor, die Maschine leistet auch bei offener Verkettung als Achtphasengenerator um 8,4% mehr, als wenn sie zur Erzeugung von Gleichstrom verwendet werden würde.

Die acht Wicklungsteile der offen verketteten Armatur lassen sich nach Fig. 68 zu vier Stromkreisen vereinigen. Die gegenüberliegenden Spulen

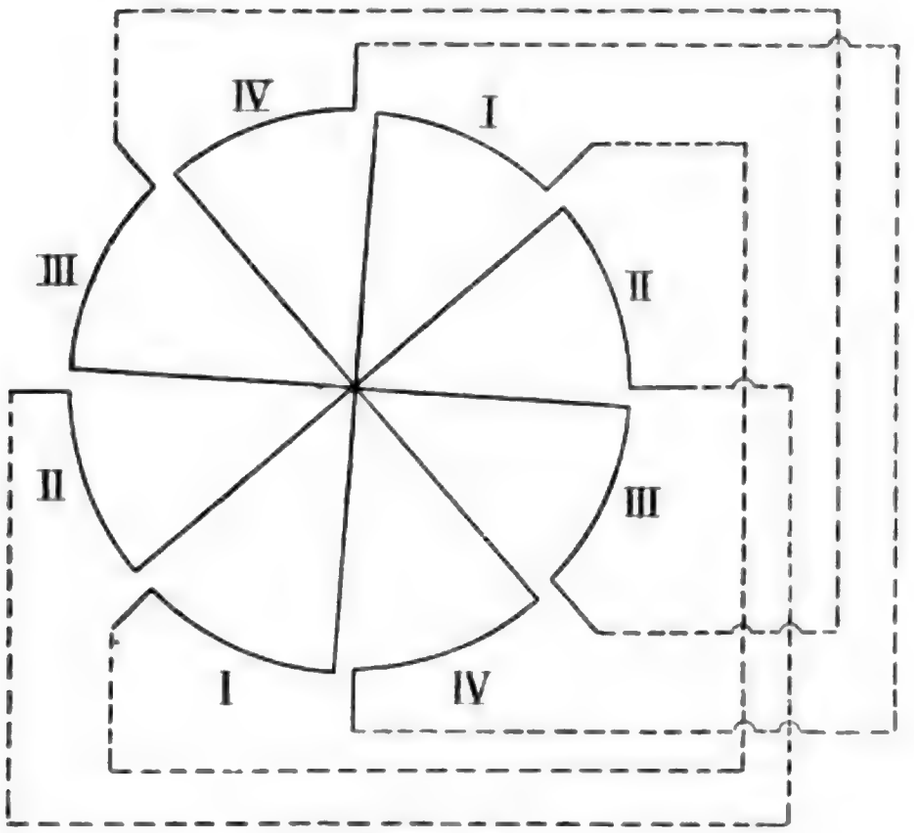


Fig. 68.

gehören zu je einem Stromkreis, sie sind mit den Ziffern *I I*, *II II*, *III III*, *IV*, *IV* bezeichnet, während bei der bisherigen Schaltungsweise zwei benachbarte Spulen zu einer Phase gehörten.

Nachdem jetzt zwei Spulen miteinander verbunden sind, in welchen elektromotorische Kräfte induziert werden, deren Phasenunterschied 180^0 beträgt, ergibt sich die resultierende Spannung als die algebraische Summe der beiden Sternspannungen. Eine Sternspannung ist

$$e_8 = 0{,}271\, e$$

folglich wird fragliche Spannungsdifferenz

$$e'_8 = 2 \cdot 0{,}271\, e = 0{,}542\, e$$

sein.

Die Stromstärke bleibt auch bei dieser Schaltung im Höchstwerte

$$i'_8 = 0{,}5\, i$$

so daß die Gesamtleistung

$$W'_8 = 4\, e_8' i_8'$$

ist, da vier Stromkreise vorhanden sind.

Die oben erhaltenen Werte substituiert, wird:

$$W'_8 = 4 \cdot 542\, e \cdot 0{,}5\, i$$

oder

$$W'_8 = 1{,}084\, e i = 1{,}084\, W.$$

Diese Schaltung unterscheidet sich also von den früher behandelten die Leistung betreffend gar nicht.

Zwölfphasiger Wechselstrom.

Bevor wir auf die allgemeine Behandlung der Mehrphasenströme, also auf den n-phasigen Wechselstrom übergehen, sehen wir die Strom- und Leistungsverhältnisse beim zwölfphasigen Wechselstrome. Wie schon die Benennung besagt, besteht dieses Stromsystem aus zwölf Wechselströmen, deren Phasenunterschied 30^0 beträgt.

Die Momentwerte der einzelnen Ströme für denselben Zeitpunkt lassen sich durch folgende Gleichungen ausdrücken:

$$i_1 = J \sin \omega t$$
$$i_2 = J \sin (\omega t + 30^0)$$
$$i_3 = J \sin (\omega t + 60^0)$$
$$i_{12} = J \sin (\omega t + 330^0).$$

Digitized by Google

In Fig. 69 sind die Vektoren dieses Stromsystems in ihrer gegenseitigen Lage dargestellt. Alle bilden miteinander den Phasenwinkel von 30°.

Bei geschlossener Verkettung der Ströme ergibt sich der Leitungsstrom als die Resultante zweier benachbarter Ströme, nachdem aber diese entgegengesetzte Richtungen haben, wird die Vektorgleichung für den resultierenden Strom

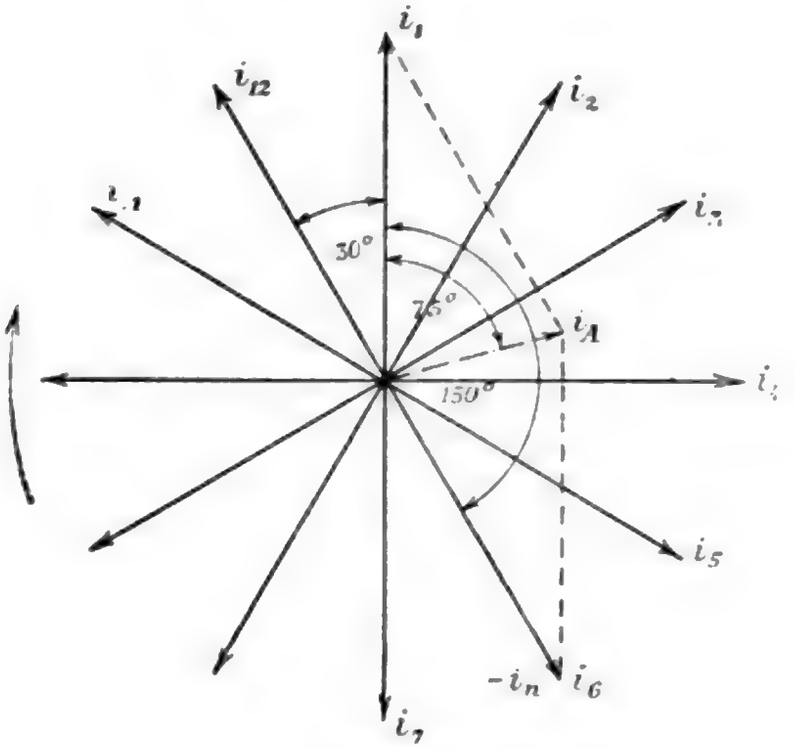


Fig. 69.

$$i_A = (+i_1)(+)(-i_{12})$$

sein.

$+i_1$ und $-i_{12}$ bilden miteinander den Phasenwinkel von 150°, da $-i_{12}$ mit der Richtung des Vektors i_6 zusammenfällt. Der resultierende Strom i_A eilt dem Komponentstrome in der Phase um 75° vor.

Die Größe des Stromes i_A wird

$$i_A = \sqrt{2\,i_1^2 - 2\,i_1^2 \cos 30^0}$$

sein.

Oder

$$i_A = \sqrt{2\, i_1^2 - \sqrt{3}\, i_1^2}$$

da

$$\cos 30^0 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

ist.

Aus obiger Gleichung ergibt sich, daß

$$i_A = \sqrt{2 - \sqrt{3}}\, i_1$$

$$i_A = 0{,}518\, i_1$$

d. h. der resultierende Strom ist bei geschlossener Verkettung zirka die Hälfte des Zweigstromes.

Für die offene Verkettung steht dasselbe, nur in bezug auf die Spannungsdifferenz zwischen zwei Hauptleitungen. Sei die Sternspannung e_{12}, dann wird die verkettete Spannung

$$e_{12}{}^{x} = 0{,}518\, e_{12}$$

sein.

Die Stromstärke ist bei dieser Schaltung in einem Zweige dieselbe als im Außenleiter:

$$i_{12}{}^{x} = i_A.$$

Bei verketteten Phasen sind zur Fortleitung des Zwölfphasenstromes mindestens zwölf Leitungen notwendig. Wollten wir die induzierten Wechselströme gesondert fortführen, dann müßte man 24 Leiter benutzen.

Wird aus derselben Armatur außer zwölfphasigem Strom auch Gleichstrom erzeugt, dann besteht zwischen der Mehrphasen- und der Gleichstromspannung ein bestimmter Zusammenhang, der folgendermaßen ausgedrückt werden kann.

Sei die geschlossen verkettete Spannung des Zwölfphasenstromes e_{12}, die Gleichstromspannung e, dann wird

$$e_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin 15^0 \, e$$

oder da:

$$\sin 15^0 = 0{,}259$$

ist

$$e_{12} = \frac{0.259}{\sqrt{2}} e$$

$$e_{12} = 0{,}183 \, e.$$

Die geschlossen verkettete Zwölfphasenspannung beträgt nur $18{,}3\,\%$ der Gleichstromspannung, vorausgesetzt, daß die Intensität des magnetischen Feldes und die Tourenzahl der Armatur in beiden Fällen dieselben bleiben.

Bei offener Verkettung sind zwei aufeinander folgende Wicklungsteile der Armatur in Serie geschaltet, die resultierende Spannung ist

$$e_{12}^{\times} = 0{,}518 \, e_{12} = 0{,}518 \cdot 0{,}183 \, e$$

$$e_{12}^{\times} = 0{,}095 \, e$$

d. h. nur $9{,}5\,\%$ der Gleichstromspannung.

Sowohl die resultierende Stromstärke, wie auch die Spannung sind kleiner als eine ihrer Komponenten. Die Ursache liegt in der großen Phasenverschiebung zwischen den Komponentwerten; je größer die Phasenzahl, um so größer wird diese Phasendifferenz sein, demnach um so kleiner die resultierende Größe in bezug auf die Komponentwerte.

Die Leistung der Zwölfphasenarmatur ist bei geschlossener Verkettung

$$W_{12} = 12 \, e_{12} \, i_{12}.$$

Vergleichen wir diese Leistung mit der maximalen Gleichstromleistung, dann wird, nachdem i_{12} höchstens $\frac{i}{2}$ sein kann, um dieselbe Armatur-

erwärmung zu verursachen

$$W_{12} = 12 \,.\, 0{,}183\, e \,.\, 0{,}5\, i$$

oder

$$W_{12} = 1{,}098\, W$$

d. h. eine Gleichstromarmatur zur Erzeugung von zwölfphasigem Wechselstrom verwendet, leistet um 9,8% mehr, als wenn sie als Gleichstromgenerator verwendet werden würde, vorausgesetzt, daß die Erwärmung der Armaturdrähte in beiden Fällen dieselbe und im Wechselstromkreise keine Phasenverschiebung ist.

Bei vorhandener Phasenverschiebung φ sind die Verhältnisse für die Mehrphasenleistung ungünstiger, denn dann wird

$$W_{12} = 1{,}098\, \cos\varphi\, W.$$

Aus dieser Gleichung läßt sich jener Leistungsfaktor bestimmen, bei welchem die Wechselstromleistung mit der Gleichstromleistung gleich wird. und zwar, nachdem in diesem Falle

$$W_{12} = W$$

ist

$$\cos\varphi = \frac{1}{1{,}098} = 0{,}912.$$

Bei offener Verkettung ist $i_{12}{}^{x} = i_A$ und die Gesamtleistung

$$W_{12}{}^{x} = 12\, e_{12}\, i_{12}{}^{x}.$$

Im Maximalwerte kann $i_{12}{}^{x} = 0{,}5\, i$ sein, also ist

$$W_{12}{}^{x} = 12 \,.\, 0{,}183\, e \,.\, 0{,}5\, i$$

oder

$$W_{12}{}^{x} = 1{,}098\, W.$$

Das Ergebnis ist dasselbe wie zuvor, in bezug auf die Leistung ist demnach zwischen der ge-

Digitized by Google

schlossenen und der offenen Verkettung kein Unterschied.

Untersuchen wir nun die Leistungsverhältnisse bei einer anderen Schaltungsweise der äußeren Stromkreise. Die Schaltung ist in diesem Falle dieselbe, als sie beim Achtphasenstrome in Fig. 68 war, mit dem Unterschiede, daß jetzt sechs Stromkreise vorhanden sind. Zu je einem Stromkreise gehören zwei gegenüberliegende Wicklungsteile der Armatur und nachdem die in denselben induzierten elektromotorischen Kräfte eine Phasendifferenz von 180^0 haben, kann ihre algebraische Summe gebildet werden. Die verkettete Spannung ist also bei dieser Schaltung

$$e_{12}' = 2\, e_{12} = 2 \,.\, 0{,}183\, e$$

oder

$$e_{12}' = 0{,}366\, e.$$

Die diese Wicklungsteile miteinander verbindenden Leiter können untereinander im neutralen Punkte verbunden sein, eine Veränderung in den Strom- und Spannungsverhältnissen wird hierdurch nicht hervorgerufen.

In jedem einzelnen Stromkreise ist die Stromstärke dieselbe wie in den Armaturteilen, soll die Erwärmung der Armaturdrähte daher dieselbe bleiben als beim Gleichstromgenerator, dann ist

$$i_{12}' = 0{,}5\, i$$

und die Gesamtleistung der Armatur bei dieser Schaltungsweise:

$$W_{12}' = 6\, e_{12}'\, i_{12}'$$

oder

$$W_{12}' = 6 \,.\, 0{,}366\, e \,.\, 0{,}5\, i$$

$$W_{12}' = 1{,}098\, W.$$

Die Armatur leistet auch bei dieser Schaltung dasselbe wie bei geschlossener oder offener Verkettung der Wechselströme.

Allgemeiner Fall.

Behandeln wir zuletzt noch den allgemeinen Fall der mehrphasigen Wechselströme, untersuchen wir die Spannungs-, Strom- und Leistungsverhältnisse beim n-phasigen Wechselstrom.

Der n-phasige Wechselstrom besteht aus n Wechselströmen, welche gegeneinander in der Phase um $\frac{2\pi}{n}$ Perioden verschoben sind. Die Momentwerte der einzelnen Ströme in demselben Zeitpunkte sind durch die Gleichungen:

$$i_1 = J \sin \omega t$$

$$i_2 = J \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{n} \right)$$

$$i_3 = J \sin \left(\omega t + 2 \frac{2\pi}{n} \right)$$

$$i_n = J \sin \left(\omega t + [n-1] \frac{2\pi}{n} \right)$$

gegeben.

Für die Spannungen in den einzelnen Phasen gelten dieselben Gleichungen.

Man unterscheidet geschlossene und offene Verkettung. Bei ersterer ist der Leitungsstrom die Resultante zweier Ströme, die eine Phasendifferenz von

$$\varphi = 180^0 - \frac{2\pi}{n}$$

haben und der Phasenunterschied zwischen diesem resultierenden und einem Komponentstrome ist

$$\frac{\varphi}{2} = 90^0 - \frac{\pi}{n}.$$

Der Wert des resultierenden Stromes ist

$$i_A = \sqrt{i_1^2 + i_n^2 - 2\, i_1\, i_n \cos \frac{2\pi}{n}}\,.$$

Nachdem aber die Effektivwerte miteinander gleich sind, wird

$$i_A = \sqrt{2\, i_n^2 - 2\, i_n^2 \cos \frac{2\pi}{n}}$$

oder

$$i_A = i_n \sqrt{2\left(1 - \cos \frac{2\pi}{n}\right)}.$$

In analoger Weise ist bei offener Verkettung die verkettete Spannung $e_n^{\times}$:

$$e_n^{\times} = e_n \sqrt{2\left(1 - \cos \frac{2\pi}{n}\right)}.$$

Bei dieser Schaltungsweise ist der Leitungsstrom mit dem Zweigstrom gleich, also:

$$i_n^{\times} = i_n.$$

Zur Fortleitung des n-phasigen Wechselstromes sind mindestens n Leiter nötig. Bei offener Verkettung ist die Anzahl der Leiter entweder n oder $(n + 1)$, je nachdem man den neutralen Punkt mit einem Außenleiter verbindet oder nicht.

Wenn eine Gleichstromarmatur dermaßen umgewandelt wird, daß sie Gleichstrom- und n-phasigen Wechselstrom liefern kann, dann ist der Wert der Wechselspannung bei geschlossener Verkettung in bezug auf die Gleichstromspannung

$$e_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{n}\, e$$

vorausgesetzt, daß die Intensität des magnetischen

Feldes und die Tourenzahl der Armatur dieselben geblieben sind.

Nachdem bei offener Verkettung zwei elektromotorische Kräfte, zwischen welchen die Phasendifferenz $180 - \frac{2\pi}{n}$ ist, in Serie geschaltet sind, wird die resultierende Spannung kleiner als eine Komponentspannung sein, wenn n größer als 6 ist.

Die Leistung kann nunmehr ausgedrückt werden; es wird nämlich bei geschlossener Verkettung

$$W_n = n\, e_n\, i_n$$

sein, oder

$$W_n = n \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{n}\, e\, i_n.$$

Vergleichen wir die n-phasen-Leistung mit der Gleichstromleistung, dann muß bei Phasengleichheit der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke

$$i_n = 0{,}5\, i$$

sein, daß die Erwärmung der Armatur dieselbe bleibt, es wird also:

$$W_n = \frac{n}{2\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{n}\, e\, i$$

oder

$$W_n = \frac{n}{2\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{n}\, W$$

wo W die Gleichstromleistung bedeutet.

Bei der offenen Verkettung ist die verkettete Spannung

$$e_n^{\times} = e_n \sqrt{2\left(1 - \cos \frac{2\pi}{n}\right)}$$

und

$$i_n^{\times} = i.$$

Die Gesamtleistung aber:

$$W_n' = n\, e_n\, i_n'.$$

Die erhaltenen Werte substituiert, wird

$$W_n^x = \frac{n}{\sqrt{2}} \sin\frac{\pi}{n}\, e \,.\, 0{,}5\, i$$

oder

$$W_n' = \frac{n}{2\sqrt{2}} \sin\frac{\pi}{n}\, W = W_n$$

d. h. dasselbe wie bei der geschlossenen Verkettung.

V. Kapitel.

Schaltungen bei Mehrphasenstromsystemen.

Einige Schaltungsweisen der Mehrphasenströme haben wir bereits behandelt. So sahen wir, daß durch geeignete Schaltung zur Fortleitung des Zweiphasenstromes anstatt vier nur drei Leiter genügen, dasselbe fanden wir beim dreiphasigen Wechselstrom, wo die Leiterzahl von sechs auf drei, höchstens vier vermindert werden konnte.

Die Konsumenten im äußeren Stromkreise müssen stets so verteilt werden, daß die Belastungen der einzelnen Phasen möglichst gleich sind. Dient z. B. der Zweiphasenstrom nur zur Beleuchtung, dann müssen die Lampen zwischen den Phasen so verteilt werden, daß jede nahezu dieselbe Anzahl Lampen mit Strom versorgt. Auch muß auf die Verwendungsweise der Lampen Bedacht genommen werden, nachdem Lampen, die die ganze Nacht und eventuell auch bei Tage brennen, eine ständige Belastung bilden im Gegensatze zu jenen, welche mehr zur Luxusbeleuchtung dienen und daher auf die Belastung der Phasen wenig Einfluß haben.

Dasselbe steht für die Belastung mit Motoren. Die Zweiphasenmotoren bilden hier eine gleichmäßige Belastung für beide Phasen, da sie im Betriebe Zweiphasenstrom benötigen. Werden aber in Zweiphasensystemen auch gewöhnliche Wechselstrommotoren, also solche für einphasigen Wechsel-

strom verwendet, welche mit dem Strome einer Phase gespeist werden, dann sind diese so zu schalten, daß die Leistungen auf beide Phasen gleichmäßig sich verteilen.

Bei dreiphasigem Wechselstrom sind ähnliche Verhältnisse vorhanden, doch wollen wir uns mit denselben eingehender befassen, da der Dreiphasenstrom mehr verbreitet ist als der eben berührte Zwei-

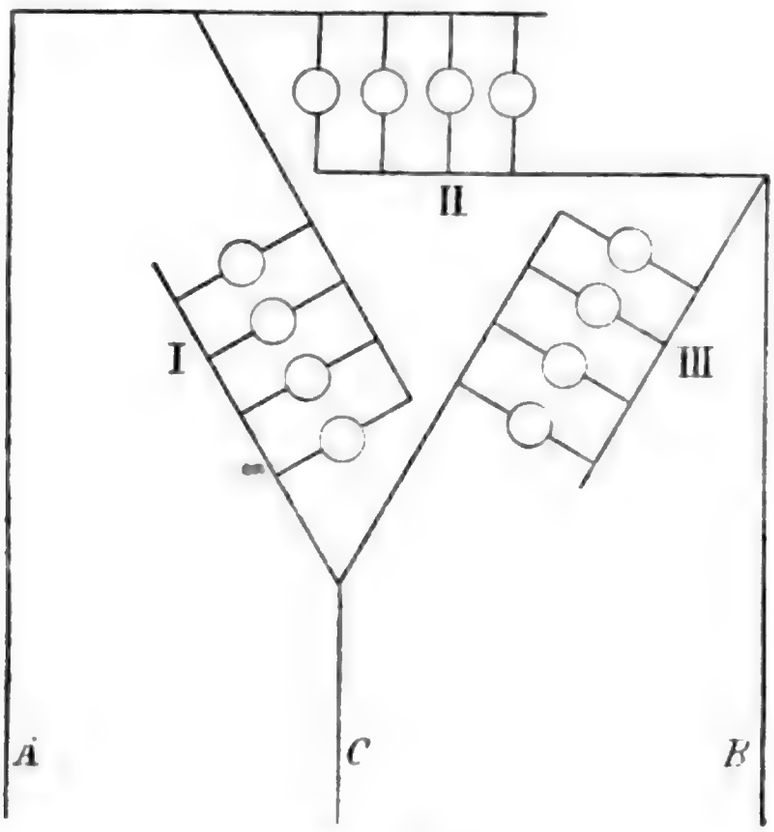


Fig. 70.

phasenstrom und deshalb die Kenntnis der Schaltungsweisen bei demselben von größerer Wichtigkeit ist.

Die Verbindungen im Drehstromerzeuger können nach drei Arten ausgeführt werden, und zwar:

1. Die einzelnen Phasen sind parallel geschaltet. Diese Schaltung heißt die Dreieckschaltung oder die geschlossene Verkettung des Dreiphasenstromes.

2. Die genannten Phasen sind miteinander in Serie geschaltet. Man erhält so die Sternschaltung oder offene Verkettung des Drehstromes.

3. Diese Schaltung ist die Kombination der unter 1. und 2. genannten Schaltungen. Der Drehstromerzeuger hat einzelne Teile in Sternschaltung, diese haben aber keinen neutralen Punkt, sondern führen zu den Endpunkten dreier anderer Teile des Generators, die unter sich in Dreieckschaltung sind.

Werden gewöhnliche Glühlampen, also solche mit einem Kohlenbügel, verwendet, dann können diese ebenfalls verschieden in das Drehstromnetz

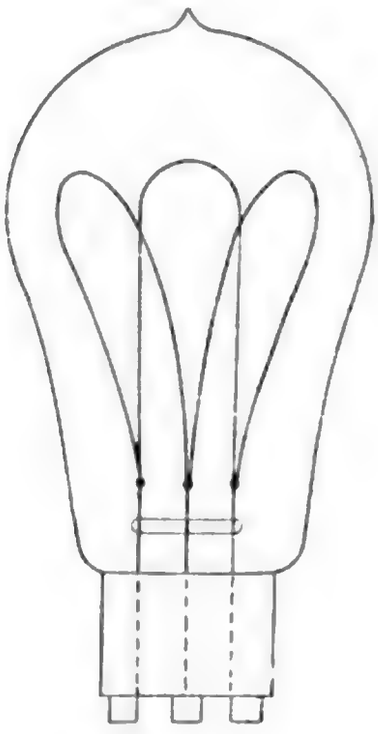


Fig. 71.

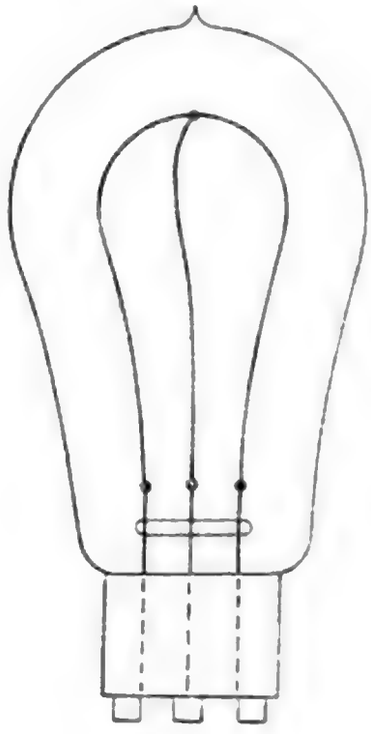


Fig. 72.

geschaltet werden. Fig. 70 zeigt jene Schaltungsweise, bei welcher die Verbindung dreier Lampengruppen nach der Art der Dreieckschaltung geschieht. Jede Lampengruppe besteht aus parallel geschalteten Lampen, die Spannung ist bei jeder Gruppe dieselbe.

Siemens & Halske in Berlin ließen im Jahre 1891 eine Glühlampe patentieren, welche anstatt des einfachen Kohlenbügels drei Kohlenfäden hatte, welche untereinander verschiedenartig verbunden wurden. Fig. 71 zeigt eine Lampe mit drei

Kohlenbügeln, welche drei Verbindungspunkte haben, während Fig. 72 eine Lampe zeigt, welche zwar ebenfalls drei Kohlenfäden hat, doch in der Verbindungsweise dieser Fäden von der früheren abweicht. Die drei Fäden führen von den Einführungspunkten zu einem gemeinsamen Punkte, diese Schaltung ist demnach mit der offenen Verkettung der Drehströme identisch.

Bei beiden Ausführungen hat die Lampe drei Kontaktstifte oder der angewendeten Phasenzahl entsprechend mehr, ebenso groß ist die Zahl der Einführungsdrähte in die Glasbirne. Die Fäden haben gleiche Widerstände, so daß beim Betriebe diese Lampen gleiche Belastungen für alle Phasen bilden.

Diese Lampen sind in den Mehrphasenstromkreis so einzuschalten, daß zu je einem Einführungspunkte einer Lampe ein Zuführungsdraht kommt, welche ihrerseits von den Hauptleitern des Mehrphasennetzes abzweigen.

Zur Konstruktion dieser Lampen führte jenes Bestreben, daß alle Phasen des Mehrphasennetzes gleichmäßig belastet werden. Verwendet man gewöhnliche Lampen, dann müssen diese gleichmäßig verteilt werden, nachdem aber auch bei der sorgfältigsten Verteilung nicht das gewünschte Resultat erreicht werden kann, da je nach Umständen die Zahl der in den einzelnen Phasen brennenden Lampen sehr verschieden sein kann, glaubte man durch die eben beschriebenen Lampen diesem Übel abzuhelfen.

Der gewünschte Zweck wurde aber nicht erreicht, denn abgesehen von den Schwierigkeiten der Herstellung solcher Lampen, sind sie im Betriebe nicht verläßlich. Die Widerstände der einzelnen Zweige können noch so sorgfältig abgeglichen werden, mit der Zeit ändern sich doch die Widerstände der einzelnen Fäden verschieden, welcher Umstand dann verursacht, daß der Wattverbrauch der einzelnen Teile einer Lampe ver-

schieden wird, was dann eben zum früheren Mangel, nämlich zur ungleichen Belastung der einzelnen Phasen führt. Auch ist nicht ausgeschlossen, daß im Gebrauche ein Faden durchbrennt, während die anderen zwei noch intakt sind; in diesem Falle sind dann die Verhältnisse in der Belastung noch ungünstiger.

Ein weiterer Nachteil besteht darin, daß z. B. beim Drehstrome jede Lampe drei Leiter benötigt.

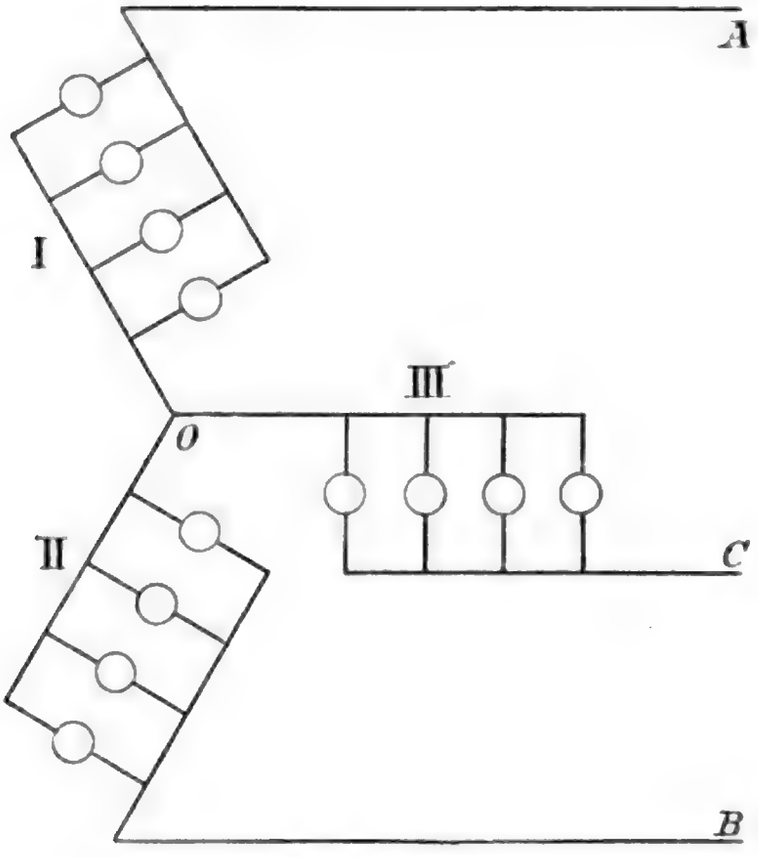


Fig. 73.

Die Lampengruppen lassen sich außer nach Fig. 70 auch nach Fig. 73 schalten. Diese Schaltungsweise ist mit der Sternschaltung der Phasen des Drehstromes identisch.

O ist der neutrale Punkt, welcher mit der Ausgleichsleitung verbunden werden kann (siehe Fig. 74). Die Anwendung des Ausgleichsleiters ist sehr vorteilhaft, wie dies auch aus folgenden Ausführungen hervorgeht.

Die Lampengruppen *I*, *II* und *III* besitzen verschiedene Anzahl von Lampen, ist jedoch die

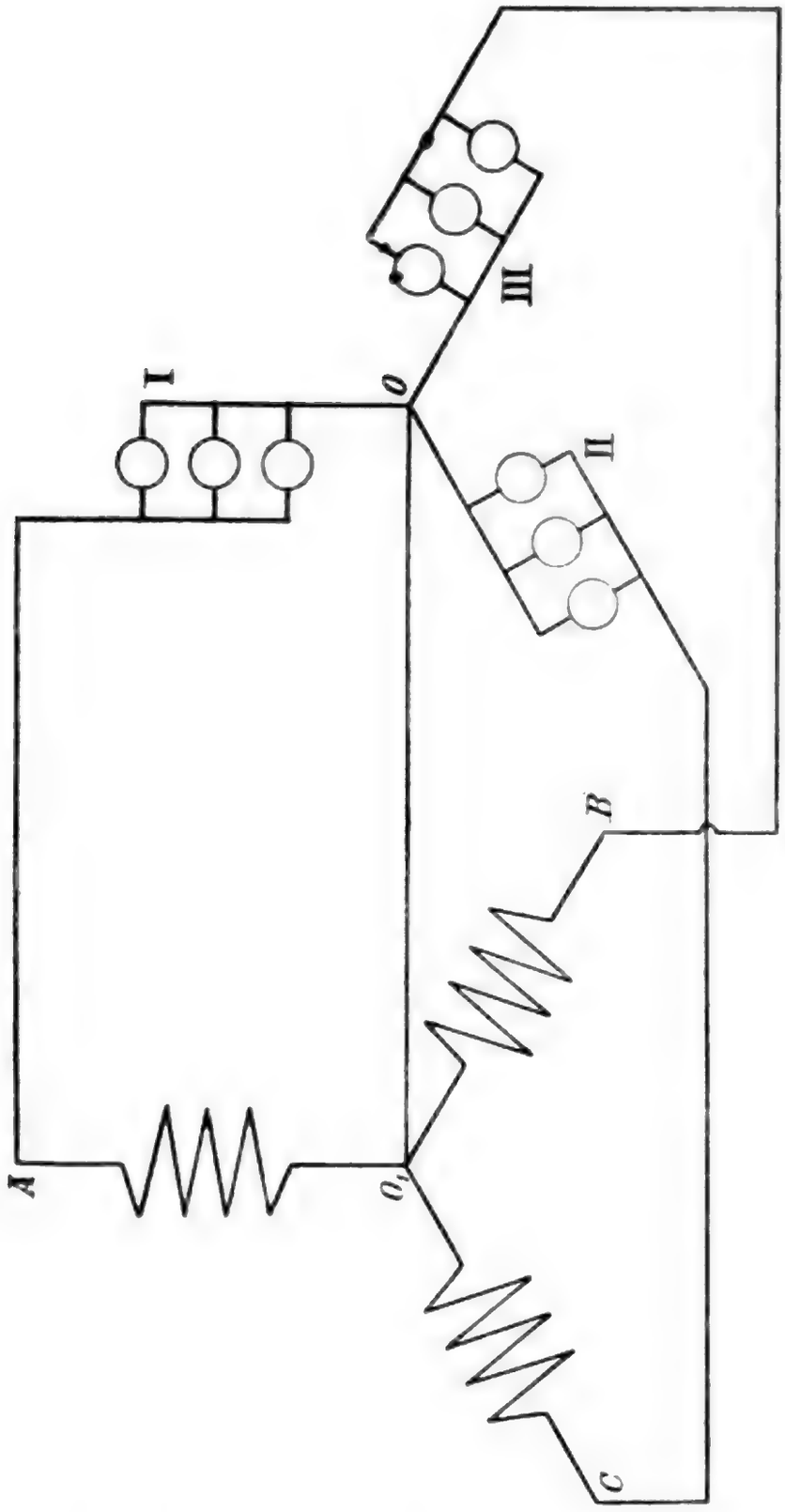


Fig. 74.

Verteilung der Belastung eine gleichmäßige, dann kann unter günstigen Umständen vorkommen, daß

dem auch in der Wirklichkeit so ist. Im allgemeinen wird aber die Stromstärke in den einzelnen Zweigen unsymmetrisch sich verteilen, was zur Folge hat, daß die Leuchtkraft der einzelnen Lampen von den übrigen nicht mehr unabhängig ist. Ist dagegen eine Ausgleichsleitung vorhanden, dann fließt der Stromüberschuß des einen Zweiges durch diesen Leiter in den Erzeuger und die anderen Lampen brennen mit derselben Helligkeit wie zuvor.

Nachdem diese Lampen durch Drehstrom gespeist werden, verteilen sich die Ströme in den einzelnen Lampengruppen in der Weise, wie es den Phasenverhältnissen entspricht, es wird also eine jede Gruppe den Maximalwert der Stromstärke erhalten, jedoch nicht zu gleicher Zeit, sondern in Zwischenpausen von $\frac{1}{3}$ Periode, da dieser Zeitraum der Phasenverschiebung von 120^0 entspricht. Ist demnach in der Lampengruppe *I* in einem gegebenen Zeitpunkte die Stromstärke maximal, dann wird im selben Zeitpunkte die Stromstärke in *II* und *III* nur die Hälfte des Maximalwertes erreichen, da die algebraische Summe der drei Stromstärken in jedem Zeitpunkte Null sein muß.

Ein weiterer Vorteil der Ausgleichsleitung ist der, daß die Regulierung des einen Stromkreises einfach und so durchgeführt werden kann, daß dadurch die anderen Stromkreise nicht gestört werden.

Beispiel.

1. In einem Drehstromnetz sollen Glühlampen nach Fig. 70 geschaltet werden. Jede Gruppe enthält 50 Stück 16-normalkerzige Lampen mit der Ökonomie von 3,2 Watt pro Kerze. Die Spannung zwischen den Leitungen ist $e = 100$ Volt. Es ist jene Stromstärke zu bestimmen, welche in einer Hauptleitung bei Vollbelastung fließt und jener Effekt, der durch alle Lampen verbraucht wird.

Die Ökonomie einer Glühlampe ist jene Zahl, welche angibt, wie viel Watt von der verbrauchten Energie auf eine Normalkerze des erzeugten Lichtes fallen. In unserem Falle bedeutet die Zahl 3,2 demnach soviel, daß diese Glühlampen für jede Normalkerze des ausgestrahlten Lichtes 3,2 Watt Energie erfordern. Eine 16-kerzige Lampe verbraucht also

$$16 \,.\, 3{,}2 = 51{,}2 \text{ Watt}$$

elektrische Energie. Brennt die Lampe eine Stunde, dann verbraucht sie 0,512 Hektowattstunde Energie, da eine Hektowattstunde = 100 Wattstunden ist. Die Stromzentralen benutzen gewöhnlich die Hektowattstunden als Energieverbrauchseinheit, der Konsument bezahlt die durch den Elektrizitätszähler angezeigten Hektowattstunden der Zentrale.

In einer Gruppe sind 50 Lampen, welche insgesamt

$$W_1 = 50 \,.\, 51{,}2 = 2560 \text{ Watt}$$

verbrauchen, folglich wird die Stromstärke in einem Zweige

$$i_1 = \frac{W_1}{e} = \frac{2560}{100} = 25{,}6 \text{ Ampère}$$

sein, da die Glühlampen nur Ohmsche Widerstände bilden und deshalb keine Phasenverschiebung verursachen.

Die Schaltung in Fig. 70 entspricht der Dreieckschaltung, folglich wird die Stromstärke in dem Hauptleiter

$$i_A = \sqrt{3}\, i_1 = \sqrt{3} \,.\, 25{,}6$$

oder

$$i_A = 44{,}29 \text{ Ampère}$$

sein.

Diese Stromstärke fließt in jeder Hauptleitung.

Die Lampen erhalten jene Spannung, welche zwischen den Hauptleitungen herrscht, da je eine Gruppe zwischen zwei Leitungen geschaltet wird.

Der verbrauchte Gesamteffekt läßt sich folgendermaßen berechnen. Nachdem alle Gruppen

gleiche Belastungen bilden, bekommt man den Gesamteffekt, wenn man den Wattverbrauch eines Zweiges mit 3 multipliziert. Es wird also:

$$W = 3\,W_1 = 3 \,.\, 2560$$

$$W = 7680 \text{ Watt.}$$

Zu demselben Ergebnis gelangt man, wenn man statt der Stromstärke in einem Zweige jene in einem Hauptleiter in Rechnung zieht. In diesem Falle ist die Gesamtleistung im Drehstromnetze

$$W = \sqrt{3}\, i_A\, e$$

oder

$$W = \sqrt{3} \,.\, 44{,}29 \,.\, 100$$

d. h.

$$W = 7680 \text{ Watt.}$$

2. In demselben Stromkreise werden die Lampen nicht nach der Dreieck-, sondern nach der Sternschaltung vereinigt (Fig. 73). Wie ändern sich die Verhältnisse.

Nachdem in diesem Falle die gegebene Spannung die offen verkettete Spannung bedeutet, müssen Lampen verwendet werden, die bei der Sternspannung die angegebene Ökonomie besitzen. Nachdem die Sternspannung kleiner als die verkettete Spannung ist, würden bei dieser Schaltungsweise die 100voltigen Lampen zu dunkel brennen.

In erster Linie muß man also jene Spannung bestimmen, auf welche die zu verwendenden Lampen zu verfertigen sind. Eine einfache Rechnung gibt uns hierüber Aufklärung.

Zwischen der offen verketteten und der Sternspannung besteht der Zusammenhang, daß

$$e_3^{\times} = \sqrt{3}\, e_3$$

wo $e_3^{\times}$ die verkettete, e_3 aber die Sternspannung bedeuten.

In unserem Falle ist

$$e_3^{\times} = 100$$

folglich

$$e_3 = \frac{e_3^{\times}}{\sqrt{3}} = \frac{100}{\sqrt{3}}$$

oder

$$e_3 = 57{,}8 \text{ Volt.}$$

Nun wird aber auch die Stromstärke von der früheren verschieden sein, denn die durch eine Lampengruppe verbrauchte Energie blieb dieselbe, doch die Spannung wurde kleiner.

Es wird demnach:

$$i_3^{\times} = \frac{W_1}{e_3} = \frac{2560}{57{,}8} = 44{,}29 \text{ Ampère}$$

die Stromstärke in einem Zweige.

Die Stromstärke fließt zugleich ungeteilt durch die Hauptleitungen, so daß

$$i_1 = i_3^{\times} = 44{,}29 \text{ Ampère}$$

d. h. dasselbe wie im vorhergehenden Falle.

Nun können wir auf die Effektberechnung übergehen

In einem Zweige ist die Stromstärke 44,29 Ampère, die Spannungsdifferenz an den Klemmen der Lampengruppe 57,8 Volt und ist in keinem Zweige Phasenverschiebung vorhanden. Es wird demnach

$$W_1^{\times} = 44{,}29 \cdot 57{,}8 = 2560 \text{ Watt}$$

und die Gesamtleistung

$$W_3^{\times} = 3 \cdot 2560 = 7680 \text{ Watt.}$$

Nehmen wir die verkettete Spannung in Betracht und berechnen mit dieser die Gesamtleistung, dann wird

$$W_3^{\times} = \sqrt{3} \cdot e_3^{\times} i_3^{\times}$$

oder

$$W_3^{\lambda} = \sqrt{3} \cdot 100 \cdot 44{,}29$$

$$W_3^{\lambda} = 7680 \text{ Watt}$$

wie zuvor.

Aus diesen Berechnungen ist ersichtlich, daß in bezug auf die Leistungsverhältnisse zwischen den zwei Schaltungsarten kein Unterschied besteht.

Welche Spannung müßte zwischen den Hauptleitern bei offener Verkettung herrschen, wollte man, daß die 100voltigen Lampen in Sternschaltung normal leuchten sollen?

Nach der Gleichung auf Seite 142 wird die gesuchte Spannung

$$e_3^{\lambda} = \sqrt{3}\, e_3 = \sqrt{3} \cdot 100 = 173 \text{ Volt}$$

und die Stromstärke bei derselben Lampenzahl wie zuvor:

$$i_A = i_3^{\lambda} = \frac{2560}{100} = 25{,}60 \text{ Ampère.}$$

Die Gesamtleistung ist also

$$W_3^{\lambda} = 3 \cdot 25{,}60 \cdot 100 = 7680 \text{ Watt}$$

oder

$$W_3^{\lambda} = \sqrt{3} \cdot 173 \cdot 25{,}60 = 7680 \text{ Watt}$$

in allen Fällen also unverändert dieselbe.

Im Anschluß an diese Aufgaben berechnen wir die Querschnitte der Leitungen unter der Voraussetzung, daß in denselben von der am Generator verfügbaren Spannung 2% verloren geht.

Die Lampen brennen bei der Dreieckschaltung mit 100 Volt, folglich muß die Generatorspannung zwischen denselben zwei Leitungen bei dem angenommenen Spannungsverluste 102 Volt sein. Alle drei Zweige sind gleichmäßig belastet, in jeder Hauptleitung fließt demnach dieselbe Stromstärke, und nachdem wir in diesem Falle voraussetzen dürfen, daß im Wechselstromnetze in allen ihren Teilen vollständige Gleichheit herrscht, teilt sich obiger Spannungsverlust in zwei gleiche Teile,

es entfällt somit für je einen Hauptleiter 1% Spannungsabfall, d. h. 1 Volt.

Sei die den Leiter durchfließende effektive Stromstärke i_A, der Ohmsche Widerstand des einen Leiters r_A, dann wird annähernd

$$1 \text{ Volt} = i_A r_A$$

und hieraus

$$r_A = \frac{1}{i_A}.$$

Dies ist nur ein angenäherter Widerstandswert, denn wie wir später sehen werden, sind bei Wechselstromleitungen nicht nur der Ohmsche Widerstand, sondern auch andere Größen in Rechnung zu ziehen, welche den Wert des resultierenden Widerstandes beeinflussen. Solche störende Ursachen sind die Selbstinduktion des Leiters, bei mehreren nebeneinander laufenden Leitern die gegenseitige Induktion und die Kapazität des Leitersystems. Außerdem hat auch die Periodenzahl des Wechselstromes Einfluß auf die Größe des scheinbaren Widerstandes.

Die letzte Gleichung angenommen, wird, die erhaltene Stromstärke substituiert,

$$r_A = \frac{1}{44{,}29} = 0{,}0226\ \Omega.$$

Wollen wir den Querschnitt des Leiters haben, dann müssen wir wissen, wie lang diese Leitung ist. Sei in unserem Falle diese Länge $l = 200\ m$.

Nur Ohmscher Widerstand vorausgesetzt, ergibt sich der gesuchte Querschnitt aus der Gleichung

$$q = \frac{l}{r_A \varrho}$$

wo ϱ die Leitfähigkeit des Leitungsmaterials bedeutet. Bei Kupfer ist $\varrho = 55 - 60$. Den kleineren Wert genommen, wird

$$q = \frac{200}{0{,}0226 \cdot 55} = 161\ mm^2.$$

Diesem Querschnitt entspricht ein Drahtdurchmesser von

$$d = 14.30\,mm.$$

Abgerundet, wird die Dicke des Drahtes 14,5 *mm* sein, welchem der Querschnitt

$$q_1 = 165\,mm^2$$

und der Widerstand

$$r_1 = \frac{200}{165 \cdot 55} = 0{,}0219\,\Omega$$

entspricht.

Der Spannungsverlust wird somit bei obigen Voraussetzungen statt 1 Volt nur:

$$e = 44{,}29 \cdot 0{,}0219 = 0{,}97 \text{ Volt}$$

sein.

In Wirklichkeit würde man natürlich keine Drähte von 14,5 *mm* Durchmesser verwenden, sondern verseilte Kabel, deren Gesamtquerschnitt gleich mit dem berechneten Querschnitte ist.

Die Sternschaltung ändert an den erhaltenen Resultaten nichts, denn wie wir sahen, fließt auch bei dieser Schaltung dieselbe Stromstärke durch die Hauptleitungen wie im ersten Falle.

Einiges über Wechselstromleitungen.

Bevor wir uns im folgenden mit den Drehstromleitungen eingehender befassen, wollen wir jene Faktoren untersuchen, welche bei der Berechnung der Wechselstromleitungen von Wichtigkeit sind. In erster Reihe sehen wir den Einfluß der Selbstinduktion.

Wir wissen, daß, wenn ein Strom durch einen viele Windungen besitzenden Leiter fließt, um denselben ein magnetisches Feld erzeugt, welches verstärkt wird, wenn die Windungen einen Eisenkern

umschließen. Wird der Stromkreis unterbrochen, dann verschwindet das magnetische Feld und man bemerkt einen hellen Unterbrechungsfunken.

Das magnetische Feld entsteht in der Weise, daß die durch eine Windung erzeugten Kraftlinien die Fläche der nächsten Windung durchsetzen, dort mit den daselbst entstandenen Kraftlinien sich vereinigen und in die umschlossene Fläche der dritten Windung eintreten u. s. w. Durch die Summation aller Kraftlinien entsteht dann ein starkes resultierendes magnetisches Feld, das noch weiter verstärkt wird, wenn im Wege des Verlaufes der Kraftlinien paramagnetische Körper, z. B. ein Eisenkern, sich befinden.

Jede Veränderung des magnetischen Feldes wirkt auf den Stromkreis zurück, d. h. das Verschwinden oder Entstehen des Feldes induziert in den Windungen Ströme, welche bei Entstehen oder Verstärken des ursprünglichen Feldes dem wirkenden Strome entgegengesetzt, im entgegengesetzten Falle aber gleichgerichtet sind. Dies ist auch die Ursache, weshalb beim Öffnen eines solchen Stromkreises ein starker Öffnungsfunke entsteht.

Diese Erscheinung ist die Selbstinduktion. Sie entsteht beim Gleichstrom nur dann, wenn die Stromstärke verändert wird, also auch beim Schließen und Öffnen des Stromkreises, denn in diesen letzteren Fällen wächst die Stromstärke von Null auf ein gewisses von der Spannung und dem Widerstande des Stromkreises abhängendes Maximum, beziehungsweise sie sinkt von diesem Wert auf Null herab.

Bei Wechselströmen ist die Selbstinduktion von großer Bedeutung, denn bei diesen wechselt die Stromstärke beständig ihren Wert und dementsprechend variiert auch die Intensität des magnetischen Feldes stark. Je rascher die Stromwechsel

einander folgen, d. h. je größer die Periodenzahl des Wechselstromes ist, um so größer wird die Wirkung der Selbstinduktion sein.

Die Selbstinduktion erzeugt eine der wirkenden elektromotorischen Kraft entgegengesetzte elektromotorische Kraft, die Gegenkraft der Selbstinduktion.

Die Gegenkraft der Selbstinduktion ist um so größer, je größer die Periodenzahl des Wechselstromes, je intensiver das erzeugte magnetische Feld ist und je mehr Windungen die Spule hat, d. h. je länger die Leitung ist. Die durch diese Gegenkraft erzeugten Ströme werden Extraströme genannt.

Die Induktionserscheinung wirkt den Veränderungen im Kraftlinienfelde entgegen, sie ist also als ein Widerstand zu betrachten. Sie tritt unter allen Umständen auf, ob nun der Leiter in Windungen verwendet oder als gerade Luftleitung ausgebildet wird, ob in der Nähe paramagnetische Materialen sich befinden oder nicht. Eben deshalb darf die Wirkung der Selbstinduktion bei Wechselstromleitungen nicht außer acht gelassen werden, insbesondere dann nicht, wenn der Leiter lang ist und in der Nähe anderer stromdurchflossener Leiter sich befindet.

Bei Kraftübertragungen werden zwei oder mehrere Leiter auf Stangen mit Hilfe von Porzellanisolatoren befestigt, um alle Leiter entsteht beim Wechselstrome ein hin- und herwogendes magnetisches Feld, das auf die Leiter zurückwirkt und so eine Selbstinduktionswirkung hervorruft. Das magnetische Feld entsteht in diesem Falle zwar in Luft, also in einem diamagnetischen Medium, immerhin ist die Wirkung dieser Selbstinduktion bei langen Leitungen so beträchtlich, daß sie nicht vernachlässigt werden darf.

Außer der Selbstinduktion tritt bei parallel laufenden Leitungen auch die Erscheinung der

gegenseitigen Induktion auf. Verändert sich nämlich in einem Leiter die Stromstärke, dann verändert sich auch das magnetische Feld; diese Änderung wirkt dann auf den anderen Leiter induzierend und es entsteht die Erscheinung der gegenseitigen Induktion.

Die gegenseitige Induktion wirkt auch als ein Widerstand, da die induzierte elektromotorische Kraft der wirkenden entgegengesetzt ist. Ihre Größe hängt von der Länge der Leitungen, von ihrem gegenseitigen Abstand und von der Natur des umgebenden Mediums ab.

Ist bei parallelen Drähten der gegenseitige Abstand d im Vergleich zur Länge l der Leitungen gering, dann ist der Koeffizient der gegenseitigen Induktion L:

$$L = 2\,l\left(\log n \frac{2\,l}{d} - 1 + \frac{\mu}{4}\right)$$

wo μ die Permeabilität des umgebenden Mediums bedeutet.

Sind die Leiter auf Spulen gewickelt, welche gleiche Längen haben, dann wird:

$$L = \frac{4}{3}\pi^2 l^2 n_1^2 n_2^2 (x - y)(y^3 - z^3)$$

wo l die Länge der Spulen, n_1 die Zahl der Windungen der äußeren Spule, n_2 jene der inneren Spule, z den inneren Radius der inneren Spule, y den äußeren Radius der inneren Spule, x den äußeren Radius der äußeren Spule bedeuten. Der innere Radius der äußeren und der äußere Radius der inneren Spule sind hier einander gleich gesetzt.

Welche sind nun die Wirkungen der Selbstinduktion bei Wechselstromleitungen?

Wir wissen, daß bei jeder Induktionswirkung die magnetische Durchlässigkeit, die Permeabilität des umgebenden Mediums und des Leitungs-

materiales von großem Einflusse ist. Deshalb ist der scheinbare Widerstand langer Leitungen bei Eisendrähten größer als bei Kupfer- oder Bronzedrähten; dieser Umstand ist besonders bei Telegraphen- und Telephonleitungen zu berücksichtigen, da bei diesen oft unterbrochene, beziehungsweise undulierende Ströme Verwendung finden. Dasselbe gilt für Blitzableiter. Jede Entladung atmosphärischer Elektrizität ist oszillierend, es entsteht bei Blitzableiterleitungen also ein oszillierendes magnetisches Feld, welches verstärkt wird, wenn diese Leitungen aus Eisen bestehen.

Kapazität.

Zwei einander gegenüberstehende, isolierte Leiter bilden einen Kondensator. Der Kondensator hat die Eigenschaft, eine gewisse Elektrizitätsmenge aufnehmen zu können, sobald er mit einer Elektrizitätsquelle verbunden wird. Die angenommene Elektrizitätsmenge hängt bei demselben Kondensator von der Spannungsdifferenz ab, welche zwischen den Belegen des Kondensators herrscht, und zwar ist die Zunahme der Elektrizitätsmenge mit der Erhöhung der Spannung direkt proportional.

Bezeichnen wir mit Q die durch den Kondensator aufgenommene Elektrizitätsmenge, mit e die Spannungsdifferenz, die an den Klemmen des Kondensators herrscht, dann ist bei ein und demselben Kondensator die Verhältniszahl

$$C = \frac{Q}{e}$$

konstant. C ist die Kapazität des Kondensators, ihre Größe hängt von der Größe und der Gestalt der gegenüberstehenden Leiter, dem gegenseitigen

Abstande und von der Natur des die Leiter voneinander isolierenden Dielektrikums ab.

Ein konzentrisches Kabel bildet auch einen Kondensator, da bei diesem die zwei Leiter in der ganzen Länge einander gegenüberstehen und durch eine isolierende Schicht voneinander getrennt sind. Die durch ein langes Kabel aufgenommene Elektrizitätsmenge kann beträchtlich werden; bei Wechselströmen ist dies darum von Wichtigkeit, weil durch das fortwährende Wechseln des Stromes das Kabel als Kondensator bald geladen und bald entladen wird und dadurch auch im unbelasteten Stromkreise eine Strömung entsteht. Diese Strömung erzeugt wattlose Ströme, welche den Erzeuger unnötig belasten.

Sowohl die Selbstinduktion, als auch die Kapazität verursachen in Wechselstromkreisen eine Phasenverschiebung, welche zwischen der Stromstärke und der Spannung auftritt. Die verursachten Phasenverschiebungen sind entgegengesetzter Natur, und zwar verursacht die Selbstinduktion eine Phasenverspätung, die Kapazität eine Phasenvoreilung des Stromes gegenüber der Spannung.

Bevor wir in die Einzelheiten der Berechnung der Wechselstromleitungen eingehen, müssen wir noch die Verteilung des Stromes in einem Leiter näher untersuchen.

Bei Gleichstromleitungen bestimmt man die Stromdichte in einem Querschnitte dadurch, daß man die Stromstärke mit dem Querschnitte dividiert. Ist z. B. die Stromdichte pro mm^2 in einem Leiter 2, so bedeutet dies, daß auf jeden mm^2 Querschnitt des Leiters 2 Ampère Stromstärke fallen, ist dann die Gesamtstromstärke gegeben, dann läßt sich der beanspruchte Querschnitt einfach berechnen.

Bei Wechselstromleitungen sind andere Verhältnisse. Die Stromdichte verteilt sich im Quer-

schnitte nicht gleichmäßig, sondern sie wird gegen die Peripherie des Leiters immer größer, am geringsten ist sie in der Achse des Drahtes.

Auch diese Erscheinung ist mit der Induktionswirkung zu erklären. Denken wir uns den Gesamtquerschnitt des Leiters aus nebeneinander liegenden feinen Drähten zusammengesetzt, in denen die Ströme dieselbe Richtung haben und in ihrer Summe die den Leiter durchfließende Stromstärke ergeben. Diese nebeneinander liegenden Leiterelemente wirken induktiv aufeinander und induzieren in den sie umgebenden Leiterelementen entgegengesetzt gerichtete Ströme. Es ist nun klar, daß diese induktive Wirkung in der Achse des Leiters am größten und an der Peripherie am geringsten ist, denn das in der Achse liegende Leiterelement ist von jeder Seite, jenes an der Peripherie aber nur von einer Seite induziert.

Wenn wir die Bedingungen des Entstehens der Induktionswirkung in Betracht ziehen, dann sehen wir, daß die ungleiche Verteilung der Stromdichte im Leiter um so größer wird, je stärker der Strom und je größer die Periodenzahl ist. Das Vergrößern der Periodenzahl verursacht eine größere Geschwindigkeit des Verschwindens der Kraftlinien und somit eine intensivere Induktionswirkung.

Aus diesen Ausführungen geht hervor, daß bei großen Stromstärken, also bei großen Querschnitten die Gestalt des Querschnittes möglichst so zu wählen ist, daß die Dicke womöglich klein bleibt. Es wird daher zweckmäßig sein, statt dicken massiven Leitungen verseilte Kabel oder wenn zulässig, bandförmige Leiter anzuwenden.

Ist der Ohmsche Widerstand des Leiters r, dann wird der scheinbare Widerstand r_1 infolge der ungleichmäßigen Verteilung der Stromdichte größer sein. Bezeichnen wir mit r_0 die Vergrößerung

des Ohmschen Widerstandes, dann ist der Gesamtwiderstand

$$r_1 = (1 + r_o)\, r.$$

Berechnet man jetzt die entstehende Stromwärme, dann muß anstatt r der scheinbare Widerstand r_1 in Rechnung gezogen werden, es wird also bei dem effektiven Strome i die gesuchte Stromwärme durch die Formel

$$W = i^2 r_1 =$$
$$= i^2 (r\,[1 + r_o])$$

gegeben, oder

$$W = i^2 r + i^2 r r_o$$

sein.

Phasenverhältnisse.

Der einfachste Fall einer Wechselstromleitung ist der, wenn der fortgeführte Wechselstrom nur zu Beleuchtungszwecken dient. Sind nur Glühlampen im Betriebe, dann sind Strom und Spannung in der Leitung miteinander in Phase und die weiterbeförderte Energie ist

$$W = e\, i \text{ Watt}$$

wenn e die Spannungsdifferenz an der Verbrauchsstelle und i die Stromstärke bedeuten.

Sind an die Leitung nur Motoren angeschlossen und sind keine Verzweigungen längs derselben, dann fließt in den Drähten ein Strom, welcher zur Spannung phasenverspätet ist. Diese Phasenverspätung ist je nach der Belastung veränderlich, bezeichnet man sie mit φ, dann ist die übertragene Energie mit dem Kosinus dieses Winkels proportional, d. h.

$$W_1 = e\, i_1 \cos \varphi.$$

Nachdem $\cos \varphi \leqq 1$, muß bei gleichbleibender Spannung und gleichen Energiemengen die Strom-

stärke i_1 um so größer werden, je größer die Phasenverspätung φ wird.

Fig. 75 zeigt den Zusammenhang zwischen den Vektoren der Spannung und der Stromstärke. Aus dem vorhergehenden Bande wissen wir, daß der Strom in solchem Falle als aus zwei Komponentströmen bestehend betrachtet werden kann, deren einer mit dem Vektor der Spannung zusammen-

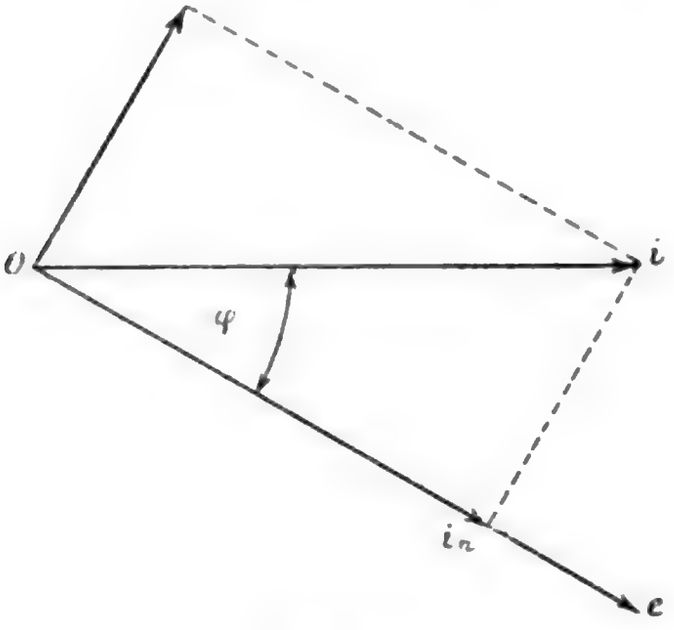


Fig. 75.

fällt, der andere aber auf diesen senkrecht steht. Die Größe des ersteren ist

$$i_n = i \cos \varphi$$

und somit die geleistete Arbeit

$$w = e\, i_n = e\, i \cos \varphi.$$

Bisher nahmen wir an, daß die Wechselstromleitung keine Abzweigung hat, sondern vom Erzeuger direkt zur Verbrauchsstelle führt. Dieser Fall ist aber sehr selten, es kommen längs einer Leitung die verschiedensten Abzweigungen vor; wir wollen nun in folgendem die Verhältnisse für solche Fälle untersuchen.

Nehmen wir an, daß aus einem Punkte der Hauptleitung mehrere Nebenleitungen abzweigen, in welche Konsumenten verschiedenster Natur eingeschaltet sind. In einer Abzweigung z. B. sind nur Glühlampen eingeschaltet (Fig. 76), der zweite Kreis speist einen Motor, im dritten ist die Belastung eine gemischte u. s. w. Es ist klar, daß für einen jeden Zweig andere Phasenverhältnisse bestehen müssen, und zwar wird die Phasenverschiebung bei reiner Glühlampenbelastung Null, bei Motoren-

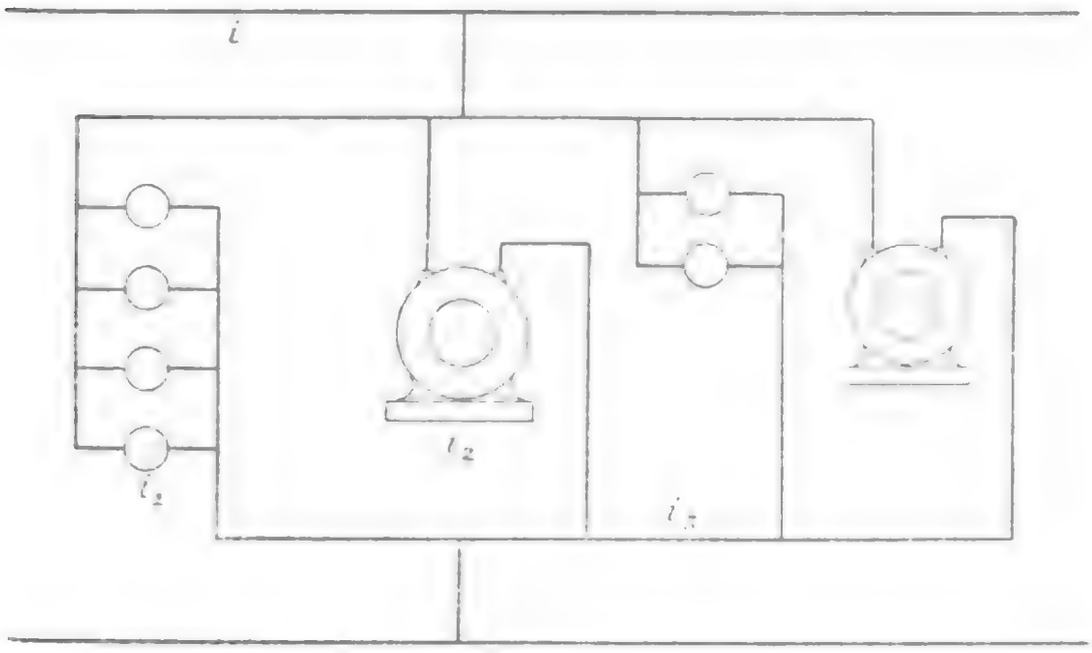


Fig 76.

belastung ein nicht zu vernachlässigender Wert, bei der gemischten Belastung ein größerer oder geringerer, je nachdem die induktive Belastung der Ohmschen Belastung gegenüber größer oder kleiner ist.

In der Hauptleitung wird unter solchen Umständen die Stromstärke auch phasenverschoben sein. Es entsteht ein resultierender Strom und eine resultierende Phasenverschiebung, welche in der im vorhergehenden Bande beschriebenen Weise leicht zu bestimmen sind.

Die senkrechte Projektion der resultierenden Stromstärke auf eine gewählte Gerade ist mit der algebraischen Summe der senkrechten Projektionen der Komponentstromstärken auf dieselbe Gerade gleich, d. h. in unserem Falle:

$$i \sin \varphi = i_1 \sin \varphi_1 + i_2 \sin \varphi_2 + i_3 \sin \varphi_3$$

wo φ_1 φ_2 und φ_3 die Phasenverschiebungen in den einzelnen Abzweigungen, φ aber die resultierende Phasenverschiebung bedeutet.

Bei Glühlichtbetrieb ist $\varphi_1 = 0$, folglich

$$i \sin \varphi = i_2 \sin \varphi_2 + i_3 \sin \varphi_3.$$

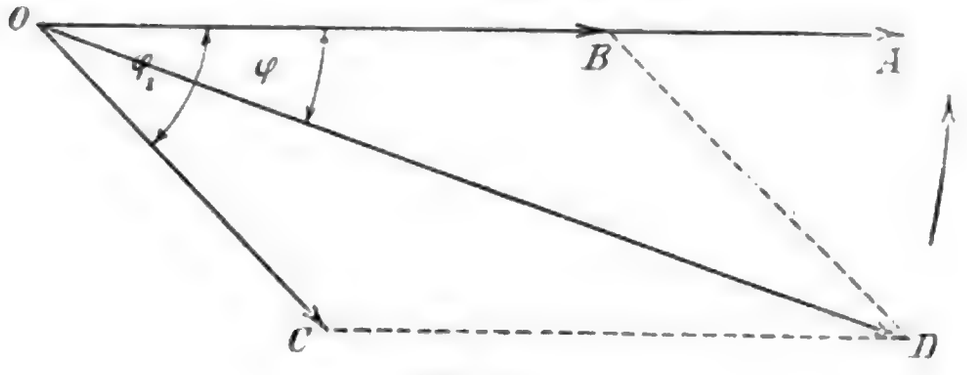


Fig. 77.

Nehmen wir den einfachen Fall an, daß aus einem Abzweigspunkte nur zwei Leitungen abzweigen, und zwar führt eine zu Glühlampen, die andere aber zu induktiven Belastungen. Es sind die Phasenverhältnisse zwischen den Strömen und jene zwischen dem resultierenden Strome und der Spannung zu bestimmen.

Bedeutet in Fig. 77 $\overline{OA}$ den Vektor der zwischen den Abzweigpunkten herrschenden Spannung, dann wird der Vektor der im Glühlampenkreise fließenden Stromstärke in dieselbe Gerade fallen, da Glühlampen nur Ohmsche Widerstände bilden. Tragen wir nun im geeigneten Maßstabe diesen Beleuchtungsstrom auf, dann wird $OB = i_1$ sein.

Anders verhält es sich in der zweiten Abzweigung. Dort sind induktive Belastungen vorhanden, folglich ist dieser Teilstrom zur Spannung phasenverspätet. Ist der Phasenverspätungswinkel φ_1, dann wird OC den Vektor der Stromstärke i_2 darstellen.

Der resultierende Strom ergibt sich aus diesen Komponentströmen nicht durch algebraische Summation, sondern in ähnlicher Weise wie die resultierende Kraft aus den Komponentkräften. Man bildet das Vektorpolygon, die schließende Seite ist die gesuchte resultierende Stromstärke. OD ist also der Vektor des in der Hauptleitung fließenden Stromes. Dieser Strom ist gegen die Spannung um den Winkel φ in der Phase verspätet.

Der resultierende Strom ist um denselben Winkel gegenüber dem Strome $OB = i_1$ phasenverspätet, dagegen eilt er dem Strome $OC = i_2$ in der Phase um den Winkel $(\varphi_1 - \varphi)$ vor.

Die Größe des Vektors OD kann man aus dem Dreieck OBD ausdrücken, und zwar:

$$OD = \sqrt{\overline{OB}^2 + \overline{BD}^2 - 2\,\overline{OB}.\overline{BD}\cos(180 - \varphi)}$$

oder da

$$\cos(180 - \varphi) = -\cos\varphi$$

wird:

$$OD = i = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + 2\,i_1\,i_2\cos\varphi}.$$

Die Tangente des resultierenden Phasenverschiebungswinkels ergibt sich aus der Figur, und zwar:

$$tg\,\varphi = \frac{OD\sin\varphi}{OD\cos\varphi} = \frac{OC\sin\varphi_1}{OC\cos\varphi_1 + OB}$$

oder

$$tg\,\varphi = \frac{i_2\sin\varphi_1}{i_2\cos\varphi_1 + i_1}.$$

Mit $\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_1}$ multipliziert, wird

$$tg\,\varphi = \frac{i_2 \frac{\sin\varphi_1}{\cos\varphi_1}\cos\varphi_1}{i_2\cos\varphi_1 + i_1} = \frac{i_2\, tg\,\varphi_1 \cos\varphi_1}{i_2\cos\varphi_1 + i_1}.$$

Multiplizieren wir noch Zähler und Nenner mit der Potentialdifferenz e, dann wird

$$tg\,\varphi = \frac{i_2\, e\cos\varphi_1\, tg\,\varphi_1}{i_2\, e\cos\varphi_1 + i_1\, e}$$

oder die Leistungswerte

$$W_1 = i_1\, e$$

$$W_2 = i_2\, e\cos\varphi_1$$

eingesetzt, ist

$$tg\,\varphi = \frac{W_2\, tg\,\varphi_1}{W_1 + W_2}.$$

Der Wert des Leistungsfaktors $\cos\varphi$ ergibt sich aus folgenden Berechnungen:

Aus den Elementen der Trigonometrie ist bekannt, daß

$$\sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1.$$

Nachdem aber

$$\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = tg\,\varphi$$

wird

$$\sin\varphi = tg\,\varphi\cos\varphi$$

oder

$$\sin^2\varphi = tg^2\varphi\cos^2\varphi.$$

Diesen Wert in die Ausgangsgleichung eingesetzt, bekommt man, daß

$$tg^2\varphi\cos^2\varphi + \cos^2\varphi = 1$$

und

$$\cos^2\varphi\,(1 + tg^2\varphi) = 1.$$

Hieraus wird:

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+tg^2\varphi}}$$

oder

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\varphi}}.$$

Für $tg\,\varphi$ den bereits erhaltenen Wert eingesetzt, ergibt sich für $\cos\varphi$:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{w_2\,tg\,\varphi_1}{w_1+w_2}\right)^2}}$$

wo laut Fig. 77 φ_1 jenen Phasenwinkel bedeutet, welchen die zwei Abzweigungsstromstärken miteinander bilden.

Die resultierende Stromstärke läßt sich auf zweierlei Weise berechnen.

Benutzen wir die auf Seite 157 befindliche Gleichung, dann wird, nachdem:

$$i_1 = \frac{W_1}{e}$$

und

$$i_2 = \frac{W}{e\cos\varphi_1}$$

die gesuchte Stromstärke i:

$$i = \sqrt{\frac{w_1^2}{e^2} + \frac{w_2^2}{e^2\cos^2\varphi_1} + 2\,\frac{w_1 w_2}{e^2\cos\varphi_1}\cos\varphi}$$

oder

$$i = \frac{1}{e}\sqrt{w_1^2 + \frac{w_2^2}{\cos^2\varphi_1} + \frac{2\,w_1 w_2}{\cos\varphi_1}\cos\varphi}.$$

i kann einfacher ausgedrückt werden, wenn man die Gesamtleistung im Hauptleiter ausdrückt.

In der ungeteilten Leitung fließt die Stromstärke i, welche gegen die Spannung e in der Phase um den Winkel φ verschoben ist. Die Leistung wird daher

$$W = e\, i \cos \varphi.$$

Hieraus ist:

$$i = \frac{W}{e \cos \varphi}.$$

W ist die Summe der Leistungen in den zwei Zweigstromkreisen, also:

$$W = w_1 + w_2.$$

Folglich wird:

$$i = \frac{w_1 + w_2}{e \cos \varphi}.$$

Mehrphasenleitungen.

Von den Mehrphasenströmen hat besonders der Drehstrom große praktische Bedeutung, wir wollen uns daher im folgenden mit den Drehstromleitungen eingehender befassen.

Man unterscheidet geschlossene und offene Verkettung des Drehstromes. Im ersteren Falle dienen zur Fortführung der elektrischen Energie drei Leiter von gleichem Querschnitte, bei letzterem ebenfalls drei, jedoch kann hier auch noch ein vierter Leiter, der Ausgleichsleiter, vorhanden sein, dessen Querschnitt entweder gleich jenen der Hauptleitungen oder nur die Hälfte derselben ist.

Sei bei einem Drehstromnetze die zu übertragende Nutzleistung W_2. Ein Teil der Energie geht längs der Leitung verloren, so daß am Anfange der Fernleitung eine Energiemenge W_1 vorhanden sein muß, welche um die Verluste größer als W_2 ist.

Die in der Leitung verlorene Energie wird demnach

$$W_o = W_1 - W_2.$$

Das Verhältnis der am Ende der Leitung zur Verfügung stehenden Energie zu jener am Anfange der Leitung benötigten Energie ist der Wirkungsgrad der Leitung. Bezeichnen wir diesen Wirkungsgrad mit η, dann wird

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_2}{W_2 + W_o}.$$

Untersuchen wir in erster Reihe die Spannungs- und die Phasenverhältnisse bei einfachen Drehstromleitungen ohne Abzweigungen.

Ist die Spannung einer Leitung am Anfange e_1^I, am Ende derselben Leitung e_2^I, dann ist infolge der auftretenden Spannungsverluste

$$e_1^I > e_2^I.$$

Nehmen wir an, daß am Anfange der Leitung zwischen der Stromstärke und der Spannung die Phasendifferenz φ_1 besteht, dann ist bei der Stromstärke i_I die Energiegröße W_1

$$W_1 = e_1^I i_I \cos \varphi_1.$$

Jede Leitung besitzt Selbstinduktion, die Folge davon ist, daß der Phasenverschiebungswinkel φ_1 längs der Leitung sich verändert und am Ende der Leitung φ_2 wird. Die Nutzleistung ergibt sich aber für:

$$W_2 = e_2^I i_1 \cos \varphi_2.$$

Wir ersehen also, daß während längs der ganzen Leitung die Stromstärke konstant bleibt, verändern sich Spannung und Leistungsfaktor, und zwar werden diese Veränderungen um so größer, je länger die Leitung ist.

Der Zusammenhang zwischen i_I, e_1^I, e_2^I und den Phasenwinkeln φ_1 und φ_2 läßt sich am einfachsten graphisch darstellen.

In Fig. 78 ist $\overline{OA}$ der Vektor der Stromstärke. Wir nahmen an, daß dieser Strom zur Spannung e_1^I um den Winkel φ_1 phasenverspätet ist, folglich wird bei der angenommenen Drehrichtung $\overline{OC}$ den Vektor der Spannung e_1^I darstellen.

Längs der Leitung entsteht ein Spannungsverlust, dessen Größe vom Widerstande der Leitung abhängt. Bezeichnen wir mit r_I den Ohmschen

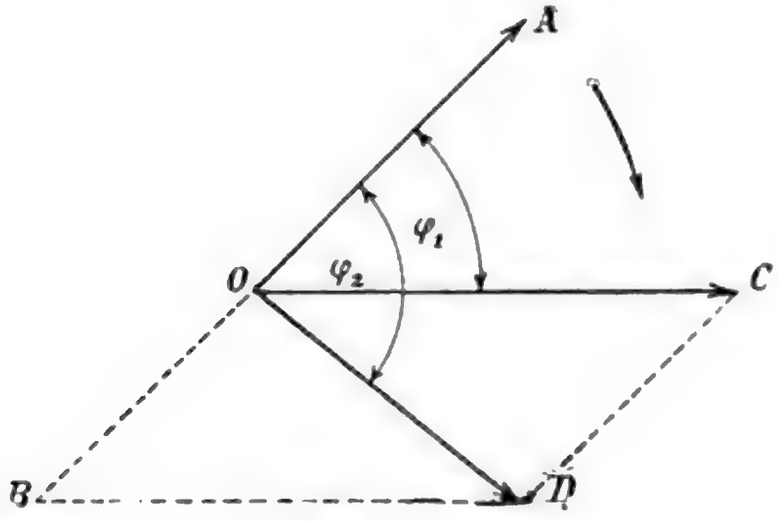


Fig. 78.

Widerstand, dann wird der Ohmsche Spannungsverlust

$$e_o = i_I r_I$$

sein.

Dieser Spannungsverlust ist mit der Stromstärke in Phase, da er jedoch eine mit der wirkenden Energie entgegengesetzte Energieströmung bedeutet, muß sein Vektor zu jener der Stromstärke um 180^0 verdreht werden. Dies bedeutet soviel, daß sowohl i_I wie e_o mit ihren Vektoren in dieselbe Linie fallen, jedoch sind ihre Richtungen einander entgegengesetzt. Wenn man also $\overline{OA}$

verlängert und auf diese Verlängerung von O aus den Ohmschen Spannungsverlust aufträgt, dann wird $\overline{OB}$ den Vektor von e_o in bezug auf Lage und Größe darstellen.

Nun ergibt sich e_2^I als die Resultante der Spannungswerte e_o und e_1^I, führt man die diesbezügliche Konstruktion durch, wird $\overline{OD} = e_2^I$ sein.

e_1^I bildet mit der Stromstärke den Phasenverschiebungswinkel φ_2.

Diese Verhältnisse betreffen eine Leitung des Dreiphasenstromes. Wollen wir die Spannungs- und Phasenverhältnisse zwischen zwei Leitungen kennen, dann muß man diese Konstruktion zweimal durchführen, und zwar zwei aufeinander folgende Phasen betreffend. Man darf hierbei nicht vergessen, daß sowohl die Spannungs-, als auch die Stromvektoren in diesen Phasen gegeneinander in der Phase um 120^0 verschoben sind.

Bezeichnen wir mit folgenden Buchstaben die einzelnen in Rechnung zu ziehenden Werte:

e_1^I die Spannung am Anfange der Leitung I,

e_2^I die Spannung am Ende der Leitung I,

e_1^{II}, e_2^{II} die entsprechende Spannungen beim Leiter II,

e_o^I und e_o^{II} die Spannungsverluste in den Leitungen I, beziehungsweise II,

e_a die Spannungsdifferenz zwischen den Anfangspunkten der Leitungen I und II,

e_e die am Ende der Leitung zwischen I und II zur Verfügung stehende Spannungsdifferenz,

φ_1^I und φ_1^{II} die Phasenverschiebungen zwischen der Stromstärke und der Spannung am Anfange der Leitungen,

φ_2^I und φ_2^{II} dieselben Phasenwinkel am Ende der Leitung und

φ die Phasenverschiebung zwischen e_a und e_e.

Sei O der Mittelpunkt des Vektordiagrammes in Fig. 79.

Wir haben am Anfange der Leitung *I* die Spannung e_1^I zur Verfügung. Diese eilt dem Strome *i* in der Phase um den Winkel φ_1^I voraus. Wir nehmen an, daß die Belastung der Phasen eine gleichmäßige ist, so daß die Stromstärke in allen

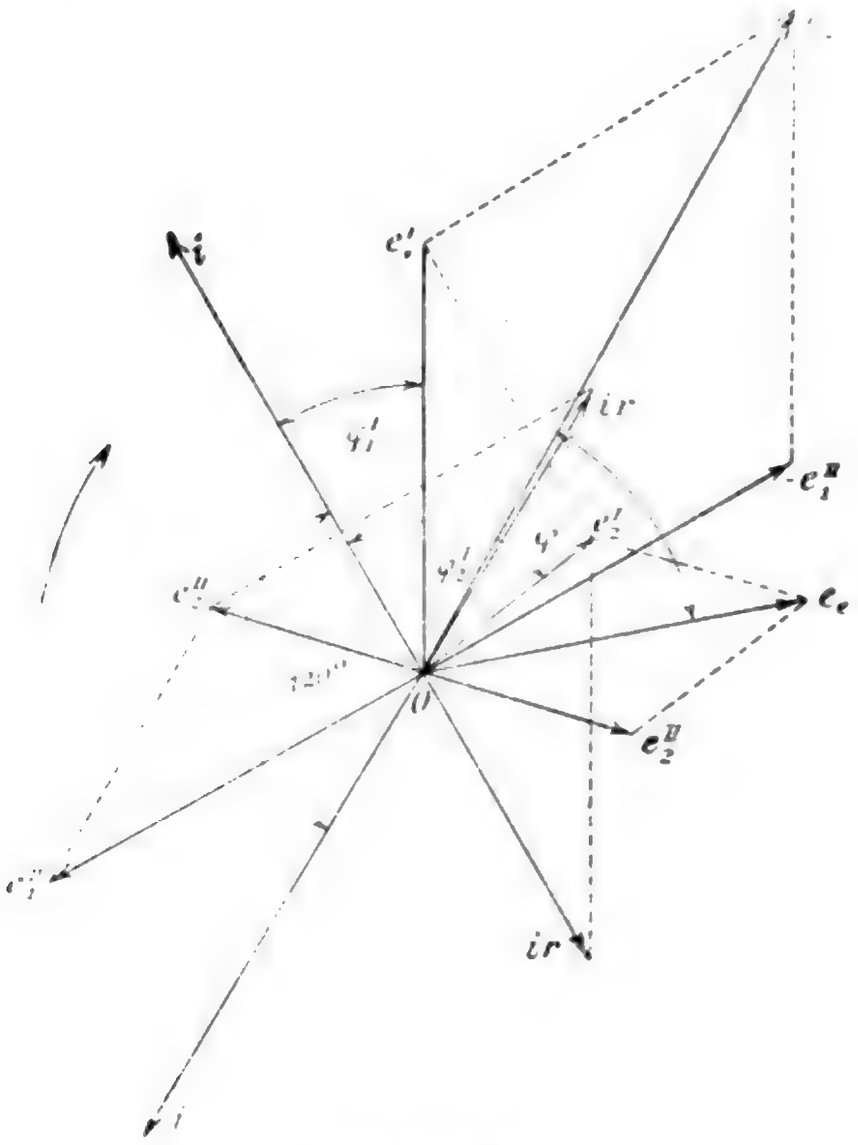


Fig. 79.

drei Leitungen dieselbe ist. Ist der Widerstand einer Leitung *r*, dann wird der Ohmsche Spannungsverlust für alle drei Leiter derselbe sein, und zwar

$$e_o = ir.$$

Tragen wir jetzt e_o auf die Verlängerung des Stromvektors in entgegengesetzter Richtung auf,

in derselben Weise wie in Fig. 78, dann wird die Resultante von ir und e_1^I die Spannung e_2^I ergeben, als den am Ende der Leitung I vorhandenen Spannungswert. Diese Spannung eilt dem Strome um den Winkel φ_2^I vor.

Dieselbe Konstruktion läßt sich auch auf die im zweiten Leiter auftretenden Spannungen durchführen, nur muß man vor Augen halten, daß in diesem Leiter die Stromstärke um 120^0 in der Phase gegen die Stromstärke im ersten Leiter verschoben ist.

Zieht man daher aus O einen zweiten Vektor, welcher zum Vektor i um 120^0 verschoben ist, dann ist damit auch die Lage des Spannungsvektors e_1^{II} gegeben, denn diese Spannung eilt der Stromstärke um denselben Winkel vor, wie e_1^I der Stromstärke i, da wir gleiche Verhältnisse im Dreiphasennetze annahmen. Es wird also:

$$\varphi_1^{II} = \varphi_1^I$$

sein.

Nun wird abermals e_o in entgegengesetzter Richtung auf die Verlängerung des Stromvektors aufgetragen und aus e_o und e_1^{II} der Spannungsvektor e_2^{II} konstruiert.

Somit sind die Spannungs- und Phasenverhältnisse auch die Leitung II betreffend bekannt und können wir nun zur Bestimmung der Spannungsdifferenzen zwischen den Anfängen und Enden der Leiter I und II schreiten.

e_a ergibt sich als die Resultante von e_1^I und e_1^{II}. Nachdem aber diese Spannungen einander entgegengesetzt gerichtet sind, wird die Vektorgleichung folgendermaßen lauten:

$$e_a = + e_1^I (+) - e_1^{II}.$$

Man muß also den Vektor durch Punkt O verlängern und auf diese Verlängerungen $-e_1^{II}$ auftragen. Die Resultante e_a ergibt sich sodann aus der Parallelogrammkonstruktion.

Dasselbe gilt für die Spannungsdifferenz e_e zwischen den Enden der Leitungen. Die Spannungskomponenten sind jetzt e_2^I und e_2^{II}.

Durch diese Konstruktion ist auch jener Phasenwinkel φ bestimmt, welchen die gesuchten Spannungen e_a und e_e miteinander einschließen. Nachdem die Drehrichtung des Vektordiagrammes mit der Uhrzeigerbewegung übereinstimmt, folgt, daß e_e der Spannung e_a in der Phase voreilt.

Die Spannungswerte e_1^I und e_2^I in Fig. 78 sind in ihren Größen um so verschiedener, je größer der Unterschied zwischen den Winkeln φ_1 und φ_2 ist. Zwischen diesen Werten besteht die Beziehung, daß

$$\frac{e_1^I}{e_2^I} = \frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1}.$$

Dasselbe gilt für die entsprechenden Spannungen in Fig. 79.

Nachdem e_1^I und e_1^{II}, sowie e_2^I und e_2^{II} miteinander 120^0 einschließen, wird

$$e_a = \sqrt{3}\, e_1^I$$

und

$$e_e = \sqrt{3}\, e_2^I.$$

Ferner ist aus dem Viereck $o\, e_1^I\, e_2^I\, i\, r$:

$$i\, r \sin \varphi_2^I = e_1^I \sin (\varphi_2^I - \varphi_1^I)$$

und hieraus

$$e_1^I = i\, r \frac{\sin \varphi_2^I}{\sin (\varphi_2^I - \varphi_1^I)}$$

folglich wird:

$$e_a = \sqrt{3}\, i\, r \frac{\sin \varphi_2^I}{\sin (\varphi_2^I - \varphi_1^I)}.$$

In analoger Weise läßt sich e_e bestimmen und es wird:

$$e_e = \sqrt{3}\, i\, r \frac{\sin \varphi_1^I}{\sin (\varphi_2^I - \varphi_1^I)}.$$

Der Spannungsverlust zwischen den beiden Leitungen ergibt sich aus der Differenz

$$e_a - e_e = \sqrt{3}\, i\, r \frac{\sin \varphi_2{}^I - \sin \varphi_1{}^I}{\sin (\varphi_2{}^I - \varphi_1{}^I)}.$$

Bei einphasigem Wechselstrome sind die Verhältnisse andere, indem dort

$$e_a = e_1{}^I$$

und

$$e_e = e_2{}^I$$

daher

$$e_a - e_e = i\, r \frac{\sin \varphi_2{}^I - \sin \varphi_1{}^I}{\sin (\varphi_2{}^I - \varphi_1{}^I)}.$$

Die Ergebnisse sind einfacher, wenn Strom und Spannung miteinander in Phase sind. Es wird dann nämlich

$$\varphi_1{}^I = \varphi_2{}^I = 0$$

daher

$$e_a - e_e = i\, r$$

beziehungsweise beim Drehstrome

$$e_a - e_e = \sqrt{3}\, i\, r.$$

Berechnung des Querschnittes einer Drehstromleitung.

Um den benötigten Querschnitt einer Drehstromleitung bestimmen zu können, gehen wir nach Dobrowolsky von den auftretenden Energieverlusten aus.

Sei am Anfange der Fernleitung die verfügbare Energie W_a, am Ende derselben W_e, dann ist der Energieverlust längs der Leitung

$$W_o = W_a - W_e.$$

Dieser Verlust wird in Wärme umgesetzt, wenn also die Intensität des Stromes i, der Widerstand eines Leiters r ist, dann ist die entstehende Wärmemenge $3\,i^2\,r$, es muß also

$$W_o = 3\,i^2\,r$$

sein.

Wie läßt sich der Ohmsche Widerstand mit den Drahtdimensionen ausdrücken?

Je länger bei gleichbleibendem Querschnitte der Draht ist, um so größer wird sein Widerstand, die Widerstandszunahme ist der Länge einfach proportional. Was den Querschnitt betrifft, ist bei gleichbleibender Länge der Widerstand um so kleiner, je größer der Querschnitt wird, der Widerstand ist demnach mit dem Querschnitte umgekehrt proportional.

Bedeutet l die Länge, q den Querschnitt des Drahtes, dann ist die Größe seines Widerstandes

$$r = \frac{l}{q\,\varrho}$$

wo ϱ eine von dem Materiale des Drahtes abhängende Konstante bedeutet.

ϱ ist das Leitvermögen des Materiales, woraus der Draht besteht. Dies ist eine Zahl, welche angibt, wie vielmal ein Draht von 1 *m* Länge, 1 mm^2 Querschnitte bei 0° C. Temperatur aus dem betreffenden Materiale den elektrischen Strom besser leitet als eine Quecksilbersäule von denselben Dimensionen und unter denselben Bedingungen.

Ist daher z. B. bei Kupfer $\varrho = 55 \sim 60$, so bedeutet dies soviel, daß das Kupfer die Elektrizität bei 0° C. $55 \sim 60$mal besser leitet als das Quecksilber von denselben Dimensionen bei derselben Temperatur.

Bei den Metallen wächst der Widerstand mit der Temperatur, Kohle und einige Legierungen

verhalten sich umgekehrt, ihr Widerstand wird bei zunehmender Temperatur immer geringer.

Den letzten Ausdruck in die vorletzte Gleichung substituiert, wird

$$W_v = 3\, i^2 \frac{l}{q\, \varrho}$$

und hieraus der gesuchte Querschnitt des Drahtes

$$q = \frac{3\, i^2\, l}{W_v\, \varrho}.$$

W_v ist der Energieverlust in den Leitungen. Dieser Verlust ist gewöhnlich in Prozenten gegeben, wenn also der prozentuelle Energieverlust durch p ausgedrückt ist, dann wird die Nutzleistung am Ende der Leitung:

$$W_e = \frac{100 - p}{100} W_a.$$

Ist z. B. $p = 5\,\%$, dann wird

$$W_e = \frac{100 - 5}{100} W_a = 0{,}95\, W_a.$$

Umgekehrt, bei gegebener Nutzleistung und prozentuellem Wattverluste in der Leitung, läßt sich die am Anfange der Leitung zu erzeugende Energie aus der Gleichung

$$W_a = \frac{100\, W_e}{100 \quad p}$$

bestimmen.

Bei $p = 5\,\%$ wird

$$W_a = \frac{W_e}{0{,}95} = 1{,}053\, W_e.$$

Der prozentuelle Wattverlust bezieht sich auf die Energiegröße W_a, es wird also bei $p\,\%$

$$W_v = \frac{p}{100} W_a$$

und

$$\frac{p}{100} W_a = \frac{3 i^2 l}{q \varrho}.$$

Hieraus läßt sich q berechnen:

$$q = \frac{3 i^2 l \, 100}{p \, W_a \varrho}.$$

Der Wert dieser Gleichung ändert sich nicht, wenn man die rechte Seite mit

$$\frac{(\sqrt{3}\, e_a \cos\varphi)^2}{(\sqrt{3}\, e_a \cos\varphi)^2} = 1$$

multipliziert.

Es wird also

$$q = \frac{3 i^2 l \, 100 \cdot 3 \, e_a^2 \cos^2\varphi}{p \, W_a \varrho \cdot 3 \cdot e_a^2 \cos^2\varphi}.$$

Im Zähler ist aber

$$3 i^2 e_a^2 \cos^2\varphi = W_a^2$$

so daß

$$q = \frac{100 \, l \, W_a^2 \, 3}{p_a \, W_a \varrho \, 3 \cdot e_a^2 \cos^2\varphi}$$

hieraus

$$q = \frac{100 \, l \, W_a}{p \varrho \, e_a^2 \cos^2\varphi}.$$

Der Querschnitt der Drehstromleitung wird nach dieser Formel berechnet, wenn der prozentuale Wattverlust gegeben ist.

Bei gegebenem Querschnitte und Energiemenge läßt sich der prozentuale Wattverlust berechnen als

$$p = \frac{100 \, l \, W_a}{q \varrho \, e_a^2 \cos^2\varphi}.$$

Beispiel.

Es soll der Querschnitt einer Leitung berechnet werden, welche die zur Glühlichtbeleuchtung benötigte elektrische Energie auf 500 *m* Entfernung überträgt. Im Betriebe sind 50 Glühlampen, welche bei der Spannung $e = 100$ Volt 16 Kerzen Lichtstärke haben und pro Kerze 3 Watt benötigen. Der Wattverlust in der Leitung soll 1,5% betragen.

Die am Ende der Leitung benötigte Energie ist

$$W_e = 50 \cdot 16 \cdot 3 = 2400 \text{ Watt.}$$

Nach Gleichung Seite 169 wird also:

$$W_a = \frac{100\, W_e}{100 - p} = \frac{100 \cdot 2400}{100 - 1{,}5}$$

oder

$$W_a = \frac{240000}{98{,}5} = 2439$$

rund

$$W_a = 2440 \text{ Watt.}$$

Die Belastung bilden nur Glühlampen, folglich ist zwischen Strom und Spannung keine Phasenverschiebung, d. h. $\cos\varphi = 1$. Es wird daher der Querschnitt des Drahtes:

$$q = \frac{100 \cdot 500 \cdot 2440}{1{,}5 \cdot 55 \cdot 100 \cdot 100}$$

d. h.

$$q = 148\ mm^2.$$

Dies würde einen Drahtdurchmesser von zirka 14 *mm* ergeben. In diesem Falle müßte man also aus mehreren dünneren Drähten verseilte Kabel benutzen.

Der Querschnitt ergab obigen großen Wert, weil die Spannung nur 100 Volt ist und der prozentuale Wattverlust auch klein angenommen wurde.

Würde man 200voltige Lampen benutzen, dann wäre bei demselben prozentualen Wattverlust der Querschnitt

$$q_1 = \frac{100 \cdot 500 \cdot 2440}{1{,}5 \cdot 200 \cdot 200 \cdot 55}$$

oder

$$q_1 = \sim 37\ mm^2$$

welchem ein Draht von zirka 7 *mm* Durchmesser entspricht.

Die Größe des Querschnittes wird durch vorhandene Phasenverschiebung erheblich beeinflußt.

Sollen z. B. die obigen 2440 Watt durch einen Motor verbraucht werden, bei welchem der Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0{,}8$ ist, dann wird

$$q = \frac{100 \cdot 500 \cdot 2440}{1{,}5 \cdot 200 \cdot 200 \cdot 55 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8}$$

hieraus

$$q = \sim 57{,}7\ mm^2.$$

Wir nahmen bisher an, daß die Leitung am Anfang Energie empfängt und diese, die entstehenden Verluste abgerechnet, nur am Ende abgibt, aber keine Abzweigspunkte besitzt. Es erübrigt uns nun noch die Untersuchung der Verhältnisse, wenn aus einem Punkte der Leitung mehrere Ströme abzweigen.

Die Zweigbelastungen sind sehr verschieden. Es können in den Zweigleitungen nur Ohmsche Widerstände vorhanden sein oder die Belastung besteht aus induktiven Widerständen oder Kapazitäten und dementsprechend sind die Verhältnisse andere.

Die Phasenverschiebungen in den einzelnen Stromkreisen sind verschieden, je nachdem die Belastungen rein Ohmsche oder induktive sind. Bei Ohmschen Widerständen ist die Stromstärke mit der Spannung in Phase, demnach ist der

Phasenverschiebungswinkel $\varphi = 0$ und der Leistungsfaktor maximal, d. h. $\cos\varphi = 1$. Bei induktiven Belastungen ist die Stromstärke zur Spannung phasenverspätet, der Wert des Leistungsfaktors ist kleiner als die Einheit, z. B. nur $0{,}7 \sim 0{,}8$.

In einem Abzweigspunkte ergibt sich demnach eine resultierende Phasenverschiebung, deren Größe von den einzelnen Phasenverschiebungen in den Zweigstromkreisen abhängt. Die Stromstärke ist die Resultierende der Teilstromstärken, ihr Wert, sowie die Richtung ihres Vektors im Vektordiagramm, also auch die resultierende Phasenverschiebung lassen sich in bekannter Weise bestimmen.

Den allgemeinen Fall der Stromabzweigungen haben wir schon behandelt, hier wollen wir nur die Strom-, Spannungs- und Phasenverhältnisse bei dreiphasigem Wechselstrome näher untersuchen.

Es ist bekannt, daß bei geschlossener Verkettung die Stromstärke im Hauptleiter eine Resultierende zweier Stromstärken ist, die eine Phasenverschiebung von 120^0 haben und es besteht der Zusammenhang, daß

$$i_A = \sqrt{3}\, i_1$$

wo i_A den Leitungsstrom, i_1 aber einen Zweigstrom, also eine Komponentstromstärke bedeuten.

Die Spannnungsdifferenz zwischen zwei Hauptleitern ist mit der Spannungsdifferenz zwischen den Endpunkten einer Wicklungsabteilung gleich, d. h. (s. Fig. 42):

$$e_A = e_1.$$

Bei offener Verkettung ist die Stromstärke konstant und die Spannungsdifferenzen verschieden, und zwar ist (s. Fig. 45):

$$e_3^{\times} = \sqrt{3}\, e$$

und für die Stromstärken

$$i_A = i_1.$$

Diese Verhältnisse bestehen auch dann, wenn in dem Drehstromnetz Belastungen in geschlossener oder offener Verkettung geschaltet werden.

Nehmen wir an, die Belastung bilden gewöhnliche, einfädige Glühlampen, dann können diese entweder nach Fig. 70 oder nach Fig. 73 geschaltet werden. Erstere entspricht der geschlossenen, letztere der offenen Verkettung.

Verbraucht ein Zweig bei der gegebenen Spannung die Stromstärke i, dann ist bei geschlossener Verkettung die Summe der Teilströme

$$J = 3\,i = 3\,\frac{i_A}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}\,i_A.$$

Bei offener Verkettung ist dagegen:

$$J = 3\,i = 3\,i_A.$$

Die Leitungen müssen dementsprechend berechnet werden, und zwar:

Der Querschnitt eines Drahtes ist

$$q = \frac{l}{r\,\varrho}$$

wo l die Länge, r den Ohmschen Widerstand und ϱ die Leitungsfähigkeit des Leiters bedeuten.

Der Widerstand r ist bekannt, sobald wir den längs der Leitung entstehenden Spannungsverlust kennen. Sei dieser Spannungsverlust e_o, dann ist (s. Seite 167):

$$e_o = i_A\,r\,\sqrt{3}$$

und hieraus

$$r = \frac{e_o}{i_A\,\sqrt{3}}.$$

In die Gleichung des Querschnittes substituiert, wird

$$q = \frac{i_A \, l \sqrt{3}}{e_o \, \varrho}$$

bei geschlossener Verkettung, nur Ohmsche Widerstände als Belastung angenommen.

Unter denselben Bedingungen wird für die offene Verkettung

$$q = \frac{l}{r \, \varrho} = \frac{i_A \, l \sqrt{3}}{e_o \, \varrho}.$$

Da aber bei geschlossener Verkettung

$$i_A = \frac{J}{\sqrt{3}}$$

und bei offener Verkettung

$$i_A = \frac{J}{3}$$

wo J die Summe der Lampenströme bedeutet, wird

$$q = \frac{J \, l \sqrt{3}}{\sqrt{3} \, e_o \, \varrho} = \frac{J \, l}{e_o \varrho}$$

beziehungsweise im zweiten Falle

$$q = \frac{J \, l}{3 \, e_o \, \varrho}$$

Nachdem aber in den Wechselstromleitungen auch Selbstinduktion auftritt, welche den Widerstand vergrößert, darf der Spannungsverlust e_o nicht als rein Ohmscher Spannungsabfall betrachtet werden. Unter solchen Umständen ist e_o jene Spannungsdifferenz, welche aus der Gleichung

$$e_o = e_a - e_e = \sqrt{3} \, i r \, \frac{sin \, \varphi_2{}^I - sin \, \varphi_1{}^I}{sin \, (\varphi_2{}^I - \varphi_1{}^I)}$$

sich ergibt (s. Seite 167).

Spannungsverluste in Wechselstromleitungen.

Fließt durch einen Leiter mit bekanntem Widerstande r ein Gleichstrom von der Intensität i, dann entsteht in der Leitung ein Spannungsverlust, dessen Größe

$$e = ir$$

ist. In solchem Falle läßt sich der Spannungsverlust einfach berechnen.

Bei Wechselstromleitungen sind die Verhältnisse komplizierter, da bei diesen außer dem Ohmschen Spannungsverluste auch ein induktiver Spannungsabfall auftritt, dessen Größe von der Selbstinduktion der Leitung abhängt.

Jeder stromdurchflossene Leiter besitzt ein magnetisches Feld, dessen Mittelstelle der Leiter ist. Der Verlauf der entstehenden Kraftlinien erfolgt in Ebenen, welche auf den Leiter senkrecht stehen. Bei einfachem Leiter sind diese Kraftlinien konzentrische Kreise, deren gemeinsamer Mittelpunkt in der Achse des Leiters liegt. Laufen zwei oder mehrere stromdurchflossene Leiter nebeneinander, so entsteht ein resultierendes Feld, dessen Kraftlinien verschiedene von dem gegenseitigen Abstande der Leiter abhängende Kurven bilden.

Beim Gleichstrome ist bei gleichbleibender Stromstärke das magnetische Feld konstant und wirkt nicht auf den Leiter zurück. Bei Wechselstrom ist dagegen das magnetische Feld infolge der wechselnden Stromstärke auch variabel, jede Variation wirkt auf den Leiter zurück und es entsteht die Erscheinung der Selbstinduktion.

Diese Selbstinduktion des Leiters vergrößert den Widerstand des Leiters und es muß ein scheinbarer Widerstand in Berechnung gezogen werden.

Nachdem die Größe der Selbstinduktion von der Länge des Leiters, von der Intensität des

Stromes und von der Größe der umschlossenen Fläche abhängt, ist durch Vergrößerung des Drahtquerschnittes in dieser Hinsicht keine Änderung zu erzielen. Die Querschnittsvergrößerung hat nur zur Folge, daß der Ohmsche Widerstand des Leiters kleiner und dementsprechend auch der Ohmsche Spannungsverlust vermindert wird, die Selbstinduktion aber wird nicht beseitigt.

Dies ist die Ursache, weshalb der Spannungsabfall bei Wechselstromleitungen, welche große Selbstinduktion besitzen, durch Vergrößerung des Leiterquerschnittes nicht verringert werden kann.

Der induktive Spannungsabfall wird Drosselung genannt.

Die Wirkung der Drosselung in Wechselstromleitungen ist nachteilig, da dadurch unter Umständen große Spannungsverluste auftreten können. Diese Drosselwirkung kann nur dadurch vermindert werden, daß man die Intensität und die Wirkung des den Leiter umgebenden magnetischen Feldes, also die Ursache der Drosselung verringert.

Die Stärke des magnetischen Feldes, welches um den Leiter entsteht, d. h. die Anzahl der Kraftlinien ist nebst der Stromstärke von jener Fläche abhängig, welche durch die Leiter umschlossen wird. Verringert man demnach die gegenseitige Entfernung der Leiter, dann wird auch die induktive Wirkung kleiner oder die Drosselwirkung wird vermindert.

Dies ist besonders bei langen Leitungen zu beobachten, denn bei diesen ist die umschlossene Fläche beträchtlich. Aus derselben Ursache sind Umwege in der Leitungsführung möglichst zu vermeiden.

Eine weitere Vorsichtsmaßregel besteht darin, daß man die Leitung möglichst gemischt führt. Durch diese Anordnung entstehen dann Leiterschleifen, in welchen die elektromotorischen Kräfte

der Selbstinduktionen einander entgegengesetzt gerichtet sind und sich in ihren Wirkungen gegenseitig abschwächen.

Die Intensität eines um einen Leiter entstehenden magnetischen Feldes hängt von der den Leiter durchfließenden Stromstärke ab. Hat man daher große Stromstärken zu übertragen, dann wird man anstatt eines Leiters von großem Querschnitte vorteilhafter mehrere Leiter von geringerem Querschnitte verwenden, erstens darum, weil der scheinbare Widerstand des dicken Leiters infolge der ungleichmäßigen Stromverteilung in demselben größer ist als bei mehreren dünneren Leitern, außerdem kann man mehrere Leiter untereinander besser vermischen und dadurch die Selbstinduktionswirkung vermindern. Bei der gemischten Führung der Leitungen achte man besonders darauf, daß zusammengehörige Leiter nicht nahe aneinander liegen, denn das würde die Beseitigung der Drosselung betreffend wenig helfen.

Der durch die Drosselwirkung entstehende Spannungsverlust läßt sich durch Vergrößern des Querschnittes nicht beheben, denn die Drosselung steht in keinem direkten Zusammenhange mit dem Querschnitte des Leiters. Die Querschnittsvergrößerung hat nur zur Folge, daß der Ohmsche Spannungsabfall bei derselben Stromstärke kleiner wird.

Die Größe der zu übertragenden Energie hängt von der Spannung, der Stromstärke und dem Phasenverschiebungswinkel ab. Je größer die Spannung, um so kleiner kann bei derselben Phasenverschiebung die Stromstärke sein. Aus diesem Grunde ist die Anwendung hoher Spannungen vorteilhaft. Man kann schwächere Leitungen anwenden, außerdem ist die Stärke des Stromes und infolgedessen die Drosselwirkung vermindert. Ein anderer Vorteil besteht darin, daß bei hohen Spannungen der

prozentuale Einfluß des induktiven Spannungsabfalles kleiner wird.

Was den induktiven Spannungsabfall betrifft, sind die Verhältnisse bei Kabeln günstiger als bei Luftleitungen, denn in Kabeln können die Leitungen einander sehr nahe gebracht werden und dadurch kann man die durch die Leiter umschlossene Fläche sehr verringern. Immerhin müssen die Leitungen ganz symmetrisch angeordnet werden, da sonst in den Eisenarmierungen des Kabels einseitig starke, periodisch sich verändernde magnetische Felder entstehen können, welche, da sie Wirbelströme induzieren, die Umhüllung des Kabels indirekt stark erwärmen könnten. Bei symmetrischer Anordnung entsteht infolge der einander entgegengesetzt gerichteten Wirkungen der Ströme kein oder nur ein schwaches magnetisches Feld, welches keine nachteilige Erwärmung verursacht.

Demgegenüber ist ein Nachteil, daß die Kabelleitungen zu teuer sind, wozu auch noch die Möglichkeit einer Resonanzerscheinung hinzutritt. Größere Spannungen sind in Kabeln ohne weiteres anwendbar, doch empfiehlt sich bei langen Leitungen aus Kostenrücksichten die Anwendung der Luftleitung. Hier ist man aber wieder in der Höhe der Spannung gebunden, denn zu große Spannungen sind der Blitzgefahr mehr ausgesetzt, außerdem muß ihre Lebensgefährlichkeit auch in Erwägung gezogen werden. In technischer Hinsicht sind keine Schwierigkeiten vorhanden, Spannungen von 40.000 bis 50.000 Volt anzuwenden.

Der induktive Spannungsabfall ist bei einer und derselben Leitung um so größer, je größer die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung ist.

Der gesamte Spannungsabfall besteht aus zwei Teilen, und zwar aus dem Ohmschen Spannungsverluste und aus der Leitungsdrosselung. Ist der

prozentuale Ohmsche Spannungsabfall im allgemeinen $a\,\%$, der induktive Spannungsverlust dagegen $b\,\%$, dann ist der Gesamtverlust $\triangle$ angenähert

$$\triangle = (a + b)\cos\varphi$$

wo φ den Phasenverschiebungswinkel zwischen Stromstärke und Spannung bedeutet.

Diese Formel gibt keine genauen Werte, da doch der Spannungsabfall in einer Leitung auch von der Periodenzahl abhängt, und diese in der Formel nicht vorkommt. Für Annäherungswerte ist sie indessen gut zu verwenden.

Beispiel.

Eine Wechselstromleitung überträgt elektrische Energie für motorische und Beleuchtungszwecke, wobei der Leistungsfaktor in der Leitung $\cos\varphi = 0{,}85$ beträgt. Ist der Ohmsche Spannungsverlust $6\,\%$, der induktive dagegen $14\,\%$, dann ist der gesamte Spannungsverlust längs der Leitung

$$\triangle = (6 + 14)\,0.85 = 17\,\%.$$

Beträgt die Betriebsspannung 1000 Volt, dann ist

$$\triangle = 170 \text{ Volt}$$

so daß am Ende der Leitung

$$e = 1000 - 170 = 830 \text{ Volt}$$

zur Verfügung stehen.

Vergrößert man den Leitungsquerschnitt auf das Doppelte, dann wird der Ohmsche Spannungsverlust nur $3\,\%$ sein, und der Gesamtverlust

$$\triangle = (3 + 14)\,0{,}85 = 14{,}45\,\%$$

oder die Endspannung

$$e = 1000 - \frac{14{,}45}{100} 1000$$

$$e = 855{,}5 \text{ Volt.}$$

Hieraus ist ersichtlich, daß eine Vergrößerung des Leiterquerschnittes den Gesamtspannungsverlust nicht erheblich vermindert, wenn in der Leitung beträchtlicher induktiver Spannungsverlust vorhanden ist.

Vergleich des benötigten Kupfervolumens bei verschiedenen Stromsystemen.

Ist bei Gleichstrom-Kraftübertragung die Intensität des Stromes J, die Länge der einen Leitung l und der erlaubte Spannungsabfall e_o, dann ist der Querschnitt des Drahtes

$$q = \frac{J\,2\,l}{e_o\,\varrho}$$

da die Gesamtlänge der Leitung $2\,l$ ist. ϱ ist die Leitfähigkeit des Drahtmateriales.

Vergleichen wir nun diese Gleichung mit jener, welche wir bei der Drehstromübertragung bei geschlossener Verkettung erhielten:

$$q = \frac{J\,l}{e_o\,\varrho}$$

so sehen wir, daß bei demselben Spannungsabfall und derselben Leitfähigkeit der Querschnitt des Drahtes im Drehstromnetze nur die Hälfte desjenigen im Gleichstromnetz ist, vorausgesetzt, daß die Stromstärken in beiden Fällen dieselben bleiben.

Nimmt man aber in Betracht, daß beim Drehstrome drei Leitungen nötig sind, dann sieht man, daß das Kupfervolumen bei diesen zwei Strom-

systemen nicht wie 1 : 2 sondern wie 3 : 4 sich verhalten, d. h. bei denselben Verlusten unter sonst gleichen Umständen ist beim Drehstrome das Kupfervolumen, also auch das Kupfergewicht um 25% geringer als beim Gleichstrome.

Bei offener Verkettung war

$$q = \frac{J\,l}{3\,e_0\,\varrho}$$

d. h. bei dieser Schaltung betragen die Drehstromquerschnitte nur den dritten Teil.

Bei gewöhnlichem einphasigen Wechselstrome ist in der Leitung dem Gleichstrome gegenüber keine Ersparnis zu erzielen, denn bei diesem benötigt man auch zwei Leitungen und ist die effektive Stromstärke, keine Phasenverschiebung vorausgesetzt, gleich mit der Gleichstromstärke, folglich ist auch der Querschnitt in beiden Fällen derselbe.

Der Einphasenstrom ist besonders in jenen Fällen anzuwenden, in welchen der Motorenbetrieb nur eine Nebenrolle spielt, d. h. in welchen der Strom hauptsächlich zur Beleuchtung benutzt wird. Wenn aber Motoren die Hauptbelastung des Stromkreises bilden, dann sind die Mehrphasenstromsysteme vorteilhafter, um so mehr, da durch die Verkettung der Ströme die Drahtwärme bei gleichen Kupfergewichten geringer wird.

Betrachten wir z. B. jenen Fall, wenn zur Arbeitsübertragung Zweiphasenstrom verwendet wird. Benutzt man vier Leitungen, dann sei die Stromstärke in einer Leitung i. Durch die Verkettung der Ströme wächst die Stromstärke nicht auf das Doppelte, sondern nur auf das $\sqrt{2}$-fache und dies ist die Ursache, weshalb das benötigte Kupfergewicht geringer wird.

Sei der Widerstand eines Drahtes bei vier Leitern r, bei verkettetem Strome dagegen, wo

nur drei Leiter nötig sind, r_1. Die Stromstärken sind nach dem Vorhergehenden i und $\sqrt{2}\,i$.

Gleiche Drahtwärmen vorausgesetzt, wird die Gleichung bestehen, daß

$$2\,i^2 r = (\sqrt{2}\,i)^2 r_1$$

oder hieraus

$$r = r_1.$$

Dies sagt soviel, daß bei verkettetem Strome die Leitung billiger ist, nachdem im ersten Falle vier, im zweiten aber nur drei Leiter desselben Querschnittes zu verwenden sind.

Zum Vergleiche des Gleichstrom-, Einphasen- und des Mehrphasenstromsystemes diene folgendes Beispiel:

Es sind 200 *PS* bei einer Spannung von 1000 Volt zu übertragen. Die in der Leitung gestatteten Verluste betragen 5% der primären Leistung. Die Länge der Leitung beträgt 500 *m*.

Die Leistung ist in Pferdestärken gegeben, wir müssen sie zuerst in elektrischen Größen ausdrücken.

Eine Pferdekraft ist mit 736 Watt äquivalent, folglich wird bei Gleich- oder einphasigem Wechselstrom:

$$e\,i = 200 \,.\, 736 = 147200 \text{ Watt.}$$

Die Spannung e ist gegeben, folglich wird die Stromstärke

$$i = \frac{147200}{e} = \frac{147200}{1000}$$

d. h.

$$i = 147{,}2 \text{ Ampère}$$

sein.

Um nun den benötigten Querschnitt ermitteln zu können, ziehen wir die auftretenden Verluste in Betracht.

5% der Gesamtenergie dienen zur Deckung der Verluste in den Leitungen. Für eine Leitung ergibt sich also die Hälfte, demnach 2,5% oder

$$e\,i\,\frac{2{,}5}{100} = 3680 \text{ Watt}.$$

Diese Wattzahl wird in Wärme umgesetzt, deren Größe mit der Stromstärke und dem Ohmschen Widerstande ausgedrückt werden kann, und zwar wird

$$i^2\,r = 3680$$

und hieraus der Ohmsche Widerstand r:

$$r = \frac{3680}{i^2}$$

oder

$$r = \frac{3680}{147{,}2^2} = \frac{3680}{21668} = 0{,}17 \text{ Ohm}.$$

Nun wird der Querschnitt des Drahtes:

$$q = \frac{500}{0{,}17 \cdot 55} = 53{,}4\ mm^2$$

welchem ein Drahtdurchmesser von rund 8,5 *mm* entspricht.

Bei dreiphasigem Strome stellen sich diese Werte folgendermaßen.

5% der gesamten Leistung gehen verloren, folglich wird:

$$3\,\frac{e\,i_0}{736} = \left(200 - 200\,\frac{5}{100}\right) = 190$$

Pferdestärken.

Nachdem $e = 1000$ Volt, wird

$$i_0 = \frac{190 \cdot 736}{3 \cdot 1000} = 46{,}61 \text{ Ampère}.$$

In einer Leitung ist also die Stromstärke

$$i = \sqrt{3}\, i_o = 1{,}732 \cdot 46{,}61$$

oder

$$i = 80{,}64 \text{ Ampère.}$$

Nun können wir auf die Bestimmung des Ohmschen Widerstandes übergehen. Es sind drei Leiter vorhanden, auf jeden fällt also ein Drittel von dem Gesamtverluste, d. h. 2453.3 Watt, so daß aus der Gleichung

$$i^2 r_3 = 2453{,}3$$

der Widerstand als

$$r_3 = \frac{2453{,}3}{i^2}$$

oder

$$r_3 = \frac{2453{,}3}{80.64^2} = 0{,}38 \text{ Ohm}$$

sich ergibt.

r_3 ist das Doppelte von r, bei Dreiphasenstrom kann also der Leiter dünner, also auch billiger sein, als bei Gleich- oder einphasigem Wechselstrome.

Aus den eben erhaltenen Werten wird der Querschnitt des Dreiphasenleiters

$$q_3 = \frac{500}{0{,}38 \cdot 55} = 24\ mm^2$$

sein, oder der Durchmesser des Drahtes rund 6 *mm*.

Der Ohmsche Spannungsverlust ist im ersten Falle

$$i\, r = 147{,}2 \times 0{,}17 = 25{,}02 \text{ Volt,}$$

im zweiten

$$i\, r_3 = 80{,}64 \times 0{,}38 = 30{,}64 \text{ Volt.}$$

Die Kupfergewichte ergeben sich aus dem Zusammenhange, daß sich diese umgekehrt wie die Widerstände verhalten, also ist diese Verhältniszahl

$$\frac{3 \times 0{,}17}{2 \times 0{,}38} = \frac{0{,}51}{0{,}76} = 0{,}67.$$

Wir haben bei dieser Berechnung vorausgesetzt, daß nur Ohmsche Spannungsverluste auftreten. Dem ist aber nicht so, denn wie wir bereits sahen, entsteht in den Wechselstromleitungen auch ein induktiver Spannungsabfall, welcher nicht außer Acht gelassen werden darf.

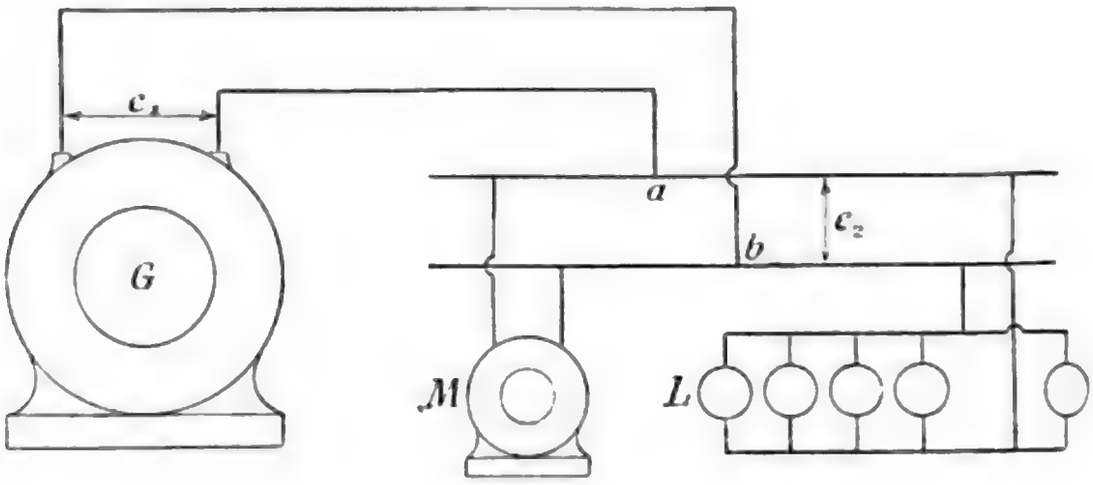


Fig. 80.

Wechselstromsysteme.

Das einfachste Wechselstromsystem für Kraftübertragung und Lichtverteilung besteht darin, daß man den Wechselstrom mit der gewünschten Spannung erzeugt und diesen ohne Zwischenschaltung von Nebenapparaten direkt zur Konsumstelle führt (Fig. 80).

Der im Generator G erzeugte einphasige Wechselstrom wird mit zwei Leitern zu den Punkten a und b geführt, von welchen die Verteilungsleitung abzweigt. Am Ende der Fernleitung ist die Spannung e_2, diese Spannung be-

anspruchen die Konsumenten. Die Spannung beim Generator G muß um die Spannungsverluste größer sein. Die Spannungsverluste ergeben sich aus dem Ohmschen und dem induktiven Spannungsabfall, die Spannung e_1 läßt sich in bekannter Weise bestimmen.

Die Konsumenten sind in diesem Falle verschiedener Natur, und zwar wird ein Motor M, sowie auch die Lampen L von derselben Verteilungsleitung abgezweigt.

Beim Dreiphasenstrome ist die Einrichtung des Stromkreises dieselbe, nur sind drei Leiter vorhanden. Die Konsumenten werden entweder zu allen drei Leitern geschaltet oder aber nur zu zwei. In letzterem Falle muß man darauf achten, daß die Belastung der einzelnen Phasen möglichst gleich sei, denn sonst würden die Belastungsverschiedenheiten in den Phasenspannungen Differenzen hervorrufen, welche eine Unabhängigkeit der Konsumenten voneinander unmöglich machen würden.

Ist bei mehrphasigen Strömen eine Ausgleichsleitung vorhanden, dann ist es zweckmäßig, die Konsumenten zwischen diese und eine Hauptleitung zu schalten. Bei dieser Schaltung gleicht der vierte Leiter die Belastungsverschiedenheiten aus, hat also dieselbe Rolle wie der Mittelleiter im Gleichstrom-Dreileiter-System und alle Konsumenten sind voneinander unabhängig.

Diese einfache Ausführung der Energieverteilung ist die billigste, jedoch nur dann anwendbar, wenn die zu übertragende Energie verhältnismäßig klein und das Stromversorgungsgebiet nicht sehr ausgedehnt ist. Bei größeren Entfernungen und größerem Energiebedarfe müßte man Leiter von großem Querschnitte verwenden, um den Spannungsabfall in den erlaubten Grenzen halten zu können, dies würde aber die Leiteranlage sehr verteuern.

In solchen Fällen benutzt man hochgespannten Strom in Verbindung mit Transformatoren.

Die Einrichtung einer solchen Anlage ist aus Fig. 81 ersichtlich. Der Wechselstromgenerator G erzeugt hochgespannten Wechselstrom, der in die Fernleitung gesandt wird. Im Sinne der Gleichung

$$W = e\,i\cos\varphi$$

welche die zu übertragende Leistung bei einphasigem Wechselstrome darstellt, kann bei gleich-

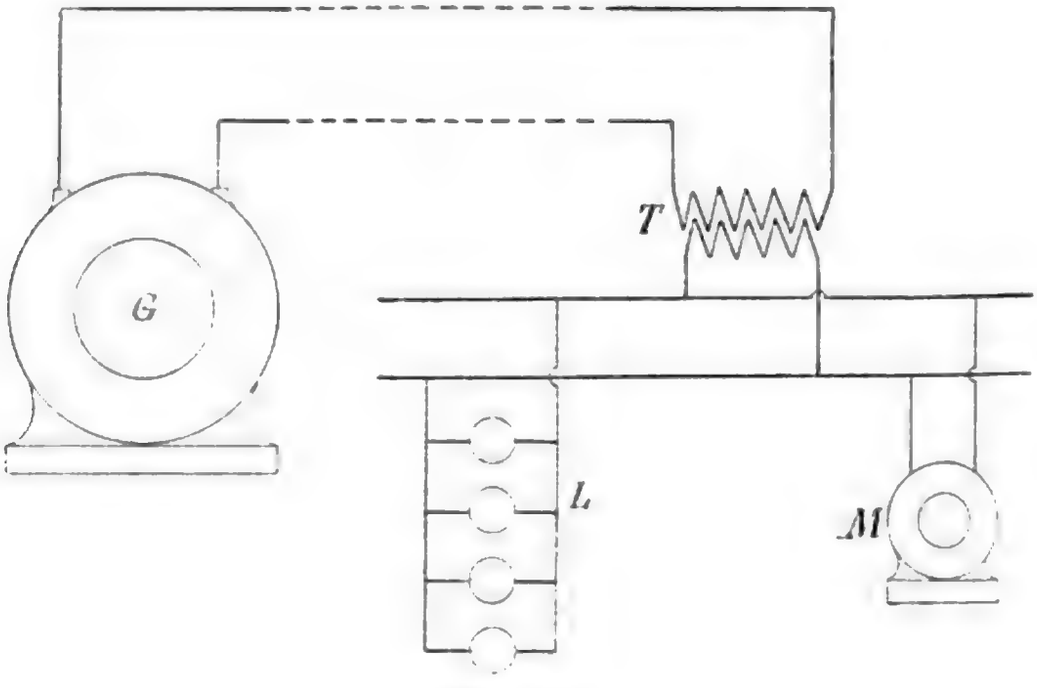


Fig. 81.

bleibender Phasenverschiebung die Stromstärke i um so kleiner sein, je höher die Spannung. Verwendet man daher verhältnismäßig große Spannungen, dann genügen kleinere Querschnitte zur Übertragung derselben Leistung, d. h. die Leitungsanlage kann durch geeignet gewählte Spannungswerte mit normalen Kosten hergestellt werden.

In welcher Weise die durch denselben Leiter zu übertragende Energiemenge durch die Vergrößerung der Spannung sich steigern läßt, ist aus folgender Zusammenstellung zu ersehen.

Der Durchmesser der Leitung sei in allen Fällen 8 *mm* und sei die konstante Stromstärke 100 Ampère. Nehmen wir an, daß in allen Fällen der Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0{,}9$ ist, dann wird die Größe der übertragbaren Energie, von den Spannungsverlusten abgesehen, bei

100	Volt	Spannung	$100 \cdot 100 \cdot 0.9 =$	9000 Watt
500	„	„	$500 \cdot 100 \cdot 0{,}9 =$	45000 „
1000	„	„	$1000 \cdot 100 \cdot 0{,}9 =$	90000 „
2000	„	„	$2000 \cdot 100 \cdot 0{,}9 =$	180000 „
3000	„	„	$3000 \cdot 100 \cdot 0{,}9 =$	270000 „

Hierzu kommt noch der nicht zu unterschätzende Umstand, daß die Spannungsverluste bei großen Spannungen prozentuell kleiner sind als bei niedrigeren.

Der hochgespannte Strom gelangt in den Transformator *T*, durch welchen er auf die gewünschte Spannung hinunter transformiert wird. Im sekundären Kreise sind die Motoren, Lampen und andere Konsumenten zueinander parallel geschaltet.

Zur Fernleitung können mehrere Transformatoren geschaltet werden, welche verschiedene oder gleiche Umsetzungsverhältnisse besitzen können, und dadurch ist die in den einzelnen Sekundärkreisen benötigte Spannung leicht herzustellen.

Zipernowsky und Déri ließen im Jahre 1887 ein System patentieren, dessen Prinzip darin besteht, daß die Transformatoren zur Hochspannungsleitung alle parallel geschaltet werden und die Konstanthaltung der Sekundärspannung dadurch erreicht wird, daß die Primärspannung konstant gehalten wird.

Die Transformatoren speisen entweder selbstständige Sekundärkreise oder arbeiten auf ein gemeinsames Sekundärnetz. In diesem Falle sind die

Sekundärwicklungen der Transformatoren entweder in Serie oder parallel geschaltet, auch kann ein Transformator zwei oder mehrere, voneinander ganz unabhängige Sekundärwicklungen haben, welche je einen Stromkreis mit Energie versorgen. Durch diese Anordnungen ist es möglich, Lampen und Motoren für verschiedene Spannungen anwenden zu können.

Vergleichen wir die in den Fig. 80 und 81 dargestellten Stromverteilungssysteme miteinander, so sehen wir, daß bei ersterem der im Generator

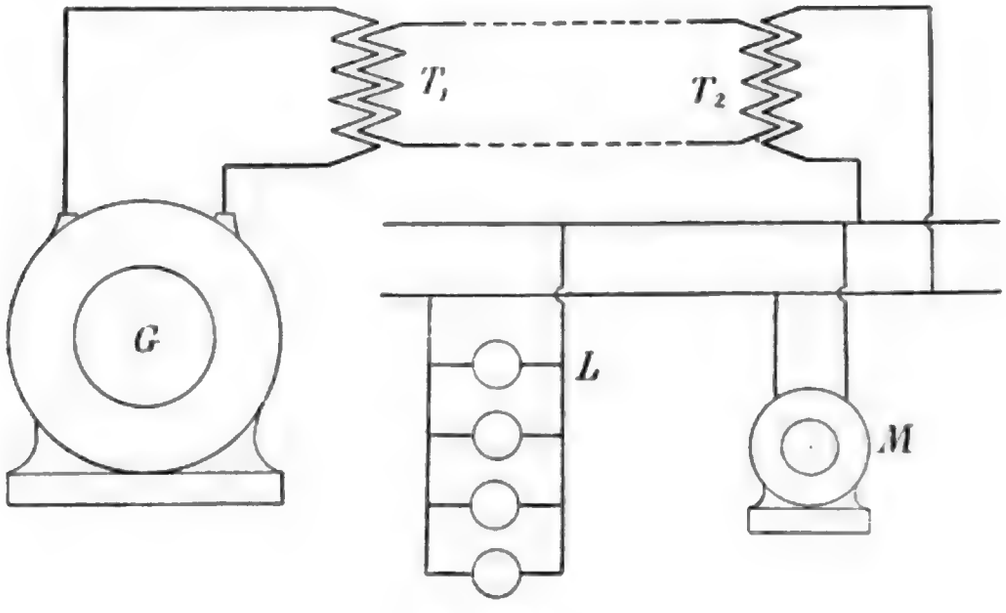


Fig. 82.

erzeugte Strom direkt zu den Konsumenten kommt, während im zweiten Falle der Strom erst transformiert wird und nur der transformierte Strom zu den Konsumenten gelangt. Im zweiten Falle ist also zwischen den Konsumenten und der primären Stromquelle keine direkte leitende Verbindung, der Zusammenhang zwischen diesen beiden Stromkreisen wird durch den Transformator gebildet.

Dementsprechend unterscheidet man

1. direkte und
2. indirekte Kraftübertragung.

Bei der indirekten Kraftübertragung verwendet man entweder einen Hochspannungsstrom erzeugenden Generator und Transformatoren bei den Verbrauchsstellen oder man benutzt einen Generator von der gewöhnlichen niederen Spannung, transformiert den Primärstrom in der Primärstation auf die erwünschte hohe Spannung, sendet diesen hochgespannten Strom in die Fernleitung und transformiert bei der Verbrauchsstelle in derselben Weise wie zuvor.

Diese Anordnung ist in Fig. 82 dargestellt. T_1 ist der primäre, T_2 der sekundäre Transformator. L sind Lampen im Sekundärkreise, M ein Motor daselbst.

Bei dieser Anordnung wird der Strom zweimal transformiert, was mit doppelten Transformationsverlusten verbunden ist. Es ist daher vorteilhafter, den Generator direkt für hohe Spannung zu bauen und nur einen Transformator zu verwenden, um so mehr da Generatoren für 2000 — 3000 Volt ohne Schwierigkeit zu bauen sind. Zwei Transformatoren wird man nur dann verwenden, wenn die Spannung in der Fernleitung überaus hohe Werte, z. B. 30.000—40.000 Volt annimmt, da bei diesen Spannungen die Betriebssicherheit der Generatoren kleiner als bei niedrigeren Spannungen ist.

Imhoff erzeugt in der Primärstation einphasigen Wechselstrom, welchen er an der Verbrauchsstelle in Drehstrom umwandelt. Die Schaltungsanordnung dieses Systemes ist aus Fig. 83 ersichtlich.

W ist der einphasige Wechselstromgenerator, welcher den Transformator T_1 speist. Die Sekundärwicklung des Transformators ist mit der Fernleitung F verbunden, welche den so erzeugten hochgespannten Strom zur Verbrauchsstelle leitet. Hier transformiert der Transformator T_2 die Spannung hinunter, der in dieser Weise doppelt transformierte Strom gelangt nun in die Maschine G, welche

aus dem einphasigen Wechselstrom den gewünschten Drehstrom erzeugt. *I*, *II* und *III* sind die Hauptleiter des Drehstromsystems.

Die Maschine *G* ist eine Gleichstromdynamo, welche Schleifringe für den Ein- und Dreiphasenstrom besitzt. Hat sie ihre Tourenzahl erreicht, dann kann man von ihrem Kollektor auch Gleichstrom fortführen. Bei dieser Anordnung wird also aus einphasigem Wechselstrom Drehstrom oder Gleichstrom oder beide Stromarten zu gleicher Zeit erzeugt.

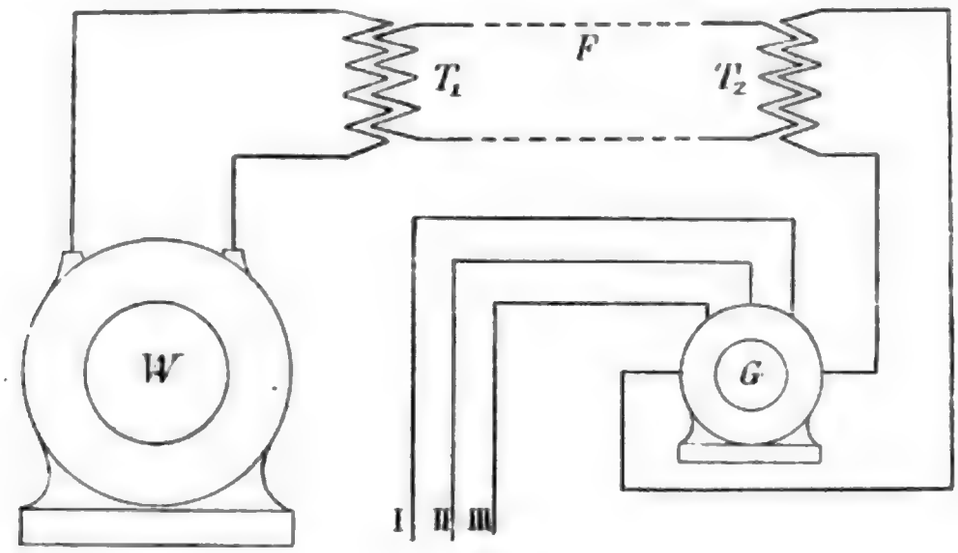


Fig. 83.

Zipernowsky arbeitete im Jahre 1891 ein Stromverteilungssystem aus, nach welchem der einphasige Wechselstrom in Gleichstrom mit Hilfe von Motorgeneratoren umgewandelt wird. Zweck dieser Anordnung ist der, daß die elektrische Energie in weitverzweigten Stromkreisen ökonomisch verteilt werden kann und daß mit Hilfe dieser Transformationsmethode auch solche Konsumenten mit Strom versorgt werden können, welche Gleichstrom benötigen.

Der Wechselstrom wird in der Primärstation mit hoher Spannung erzeugt und nur an der Verbrauchsstelle auf die gewünschte Spannung hinuntertransformiert und in den Wechselstrommotor

geführt. Auch kann die Anordnung eine solche sein, daß der spannungserniedrigende Transformator ganz weggelassen und der hochgespannte Strom direkt in den Wechselstrommotor geleitet wird. Dieser Motor treibt eine Gleichstrommaschine, mit welcher er direkt gekuppelt ist, der so erhaltene Gleichstrom wird dann zu den Konsumstellen geführt.

Fig. 84 ist die schematische Darstellung dieses Verteilungssystems.

In den Zentralstationen *C C* wird hochgespannter Wechselstrom erzeugt, welcher in den Leitungen

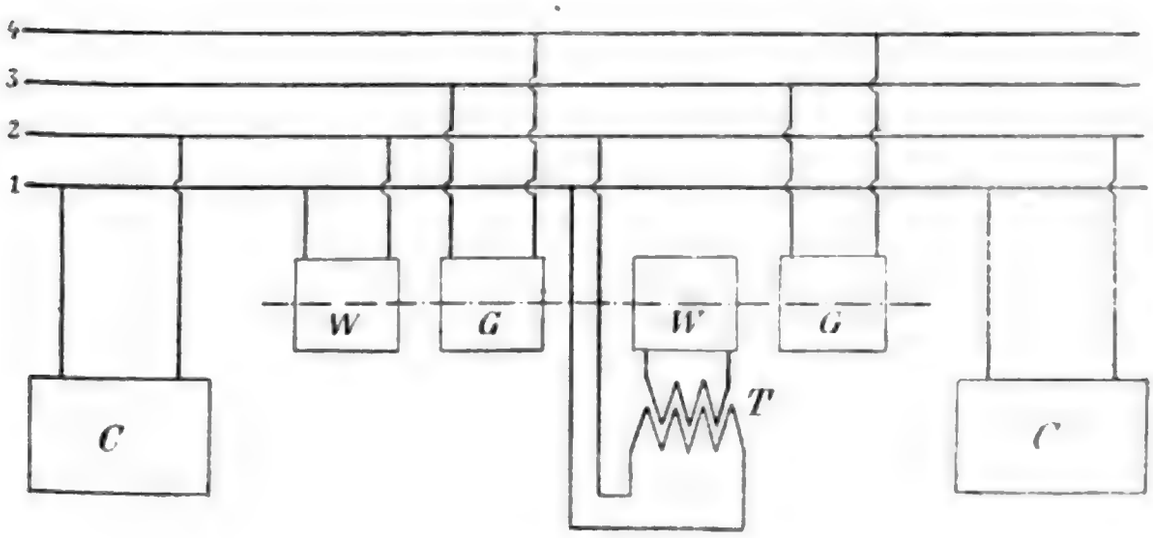


Fig. 84.

1, 2 fließt. An diese Leitungen sind die Motoren der Motorgeneratoren *W G* angeschlossen; diese erhalten entweder den hochgespannten Strom oder wird zwischen dem Motor und der Hochspannungsleitung noch ein Transformator *T* eingeschaltet, welcher ermöglicht, daß der Motor mit niedrig gespanntem Wechselstrom betrieben werden kann.

Der mit dem Motor direkt gekuppelte Gleichstromgenerator *G* erzeugt Gleichstrom, welcher in die Leitungen 3, 4 fließt. Zu diesen Leitungen werden die Konsumenten geschaltet.

Es ist vorteilhaft, im Gleichstromnetz Akkumulatorenbatterien aufzustellen, um mit ihnen die

Motorgeneratoren in Betrieb setzen zu können. Die Arbeitsweise der Wechselstrom-Gleichstrom-Transformatoren ist nämlich die folgende.

Wird ein Motorgenerator bei diesem System in Betrieb gesetzt, dann muß zuerst der Motor auf synchronen Gang gebracht werden, nur dann kann er mit der Wechselstromleitung zusammengeschaltet werden. Am einfachsten läßt sich dies dadurch erreichen, daß man die Gleichstromdynamo erst als Gleichstrommotor benutzt und so den Synchronmotor auf die benötigte Tourenzahl bringt. Dann kann der Wechselstrommotor an die Wechselstromleitung angeschlossen werden, die Gleichstromdynamo gibt nun Gleichstrom in das Gleichstromnetz ab.

Sind Akkumulatoren vorhanden, dann liefern diese den Gleichstrom für den Gleichstrommotor, sind aber schon Motorgeneratoren im Betrieb, dann kann der zum Inbetriebsetzen eines Motorgenerators benötigte Gleichstrom diesen entnommen werden. Die Magnete des Synchronmotors werden aus derselben Gleichstromquelle erregt.

Mit dieser Anordnung kann man den einphasigen Wechselstrom für Bahnbetrieb in der Weise benutzen, daß man die Bahnmotoren mit dem transformierten Gleichstrom speist. In diesem Systeme sind demnach die Vorteile der ökonomischen Stromverteilung mit dem Vorteile, Gleichstrommotoren anwenden zu können, vereinigt und hierdurch alle Bedingungen erfüllt, welche ein Stromverteilungsnetz erfordert.

Imhoff proponierte 1894 das Wechselstromsystem, welches ermöglichte, einphasige Wechselstrommotoren unter Belastung angehen zu lassen. Die einphasigen Wechselstrommotoren haben nämlich den Nachteil, daß sie nicht von selbst und unter Last angehen. Dies ist auch die Ursache, weshalb diese Motoren zum Bahnbetriebe sich nicht eignen. Würden sie auch allein angehen, könnte man sie

in diesem Falle nicht benutzen, weil der Bahnmotor unter allen Umständen nur belastet angehen kann, da doch das Inbewegungsetzen eines Wagens auch eine ziemlich große Belastung bildet, wenn auch der Wagen nicht besetzt ist. In neuerer Zeit baut man zwar Motoren, welche bei Einphasenstrom auch unter Belastung angehen, doch in jener Zeit waren diese Motoren noch nicht bekannt und man war darauf angewiesen, den obengenannten Nachteil des Einphasenmotors mit Kunstgriffen zu beseitigen.

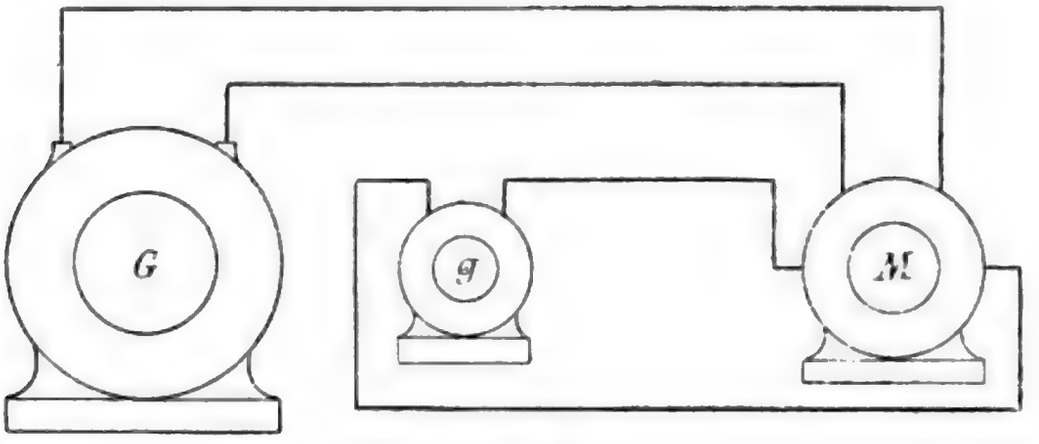


Fig. 85.

Imhoffs Anordnung benutzt neben dem Betriebsstrom auch einen Hilfsstrom, welcher zum ersteren in der Phase verschoben ist. Zu diesem Zwecke sind in der Primärstation zwei Generatoren aufgestellt, wie aus Fig. 85 ersichtlich.

G ist der Generator, welcher den einphasigen Wechselstrom liefert. Ein zweiter Generator *g*, welcher kleiner als *G* sein kann, erzeugt den Hilfsstrom. Nachdem der Hilfsstrom nur bei Anlassen des Motors, also für kurze Zeit benutzt wird, kann die Hilfsstromleitung verhältnismässig schwach gewählt werden, außerdem kann man zur Rückleitung des Hilfsstromes den einen Hauptleiter benutzen, so daß nur drei Leiter genügen, welche keine allzugroßen Investitionen erheischen.

Im Motor *M* erzeugen der Betriebs- und der Hilfsstrom ein Drehfeld, welches ermöglicht, daß der einphasige Motor unter Belastung angeht.

Versieht man den Generator *G* mit einer zweiten Wicklung, dann kann der Generator *g* wegbleiben und die Investitionskosten werden geringer.

Der Hilfsstrom wird nur bei den Motoren verwendet, alle anderen Konsumenten, wie z. B. die elektrischen Lampen, Heizapparate etc., werden zwischen die Hauptleitungen geschaltet.

Monocyclic System.

Dieses System wurde von der General Electric Company veröffentlicht und besteht darin, daß man durch geeignete Schaltungen phasenverschobene Ströme erzeugt, welche ermöglichen, daß Motoren mit starker Anzugskraft anlaufen.

Zu diesem Zwecke erhält der Wechselstromgenerator eine Zusatzwicklung, welche so angeordnet ist, daß der in ihr induzierte Strom in der Phase um 90^0 gegen den Hauptstrom verschoben ist. Man hat hier also zwei Ströme, zu deren Fortleitung drei Leiter genügen. Die elektrischen Lampen sind zwischen die Hauptleiter geschaltet, die Motoren werden dagegen mit allen drei Leitern verbunden.

Die verwendeten Induktionsmotoren, deren Wirkungsweise und Eigenschaften im nachfolgenden Bande ausführlich beschrieben sind, haben zwei Wicklungen, deren Ebenen senkrecht aufeinander stehen. Fließt nur der Hauptstrom durch die eine Wicklung, dann wird in den Ankerwindungen ein Strom induziert, welcher in der Phase um 90^0 hinter dem magnetischen Felde der Hauptstromspule zurückbleibt. Aus diesem Phasenverhältnisse folgt, daß das durch den induzierten Armaturstrom erzeugte magnetische Feld dieselbe Richtung als das

Hauptstromfeld hat, es kann deshalb kein Drehmoment entstehen, d. h. der Motor lauft allein nicht an.

Will man ein Drehmoment erzeugen, dann muß man phasenverschobene Ströme anwenden und zu diesem Zwecke hat der Motor die erwähnte zweite Wicklung. In diese fließt der phasenverschobene Hilfsstrom, der ein dem Hauptfelde um 90^0 verschobenes magnetisches Feld erzeugt. Dieses und das durch den im Anker induzierten Strom erzeugte Feld wirken nun aufeinander und erzeugen ein Drehmoment, welches ein Anlaufen des Motors verursacht. Die Geschwindigkeit des Motors nimmt immer mehr zu, bis zu einer Grenze, welche von der Wechselzahl des Wechselstromes abhängt.

Durch die Drehung der Armatur wird der induzierte Strom in der Drehrichtung des magnetischen Feldes mitgenommen, es entsteht ein resultierender verschobener Pol, welcher in der Hilfswicklung des Motors einen Strom induziert, welcher als Hilfsstrom für andere Motoren verwendet werden kann.

Ist also ein solcher Motor im Betrieb, dann kann die Hilfsleitung der anderen Motoren mit ihm verbunden werden und wird noch der Hauptstrom in diese noch stillstehenden Motoren eingeschaltet, dann laufen diese kräftig an.

Mit Hilfe eines im Betriebe sich befindenden Motors können in dieser Weise mehrere Motoren angelassen werden.

Die Hilfswicklung verbraucht verhältnismäßig wenig Energie, da sie nur zur Erzeugung eines magnetischen Feldes verwendet wird. Die Stromstärke ist dementsprechend klein und der Hilfsleiter kann auch aus dünnerem Drahte bestehen.

Kombiniertes Verteilungssystem für Gleich- und Wechselstrom.

Es kommt oft vor, daß man eine billige Betriebskraft, z. B. einen Wasserfall für Arbeitsübertragungen benutzen könnte, jedoch ist der Verbrauchsort zu entfernt gelegen und die Konsumenten sind solcher Natur, daß sie neben dem Wechselstrom auch Gleichstrom benötigen.

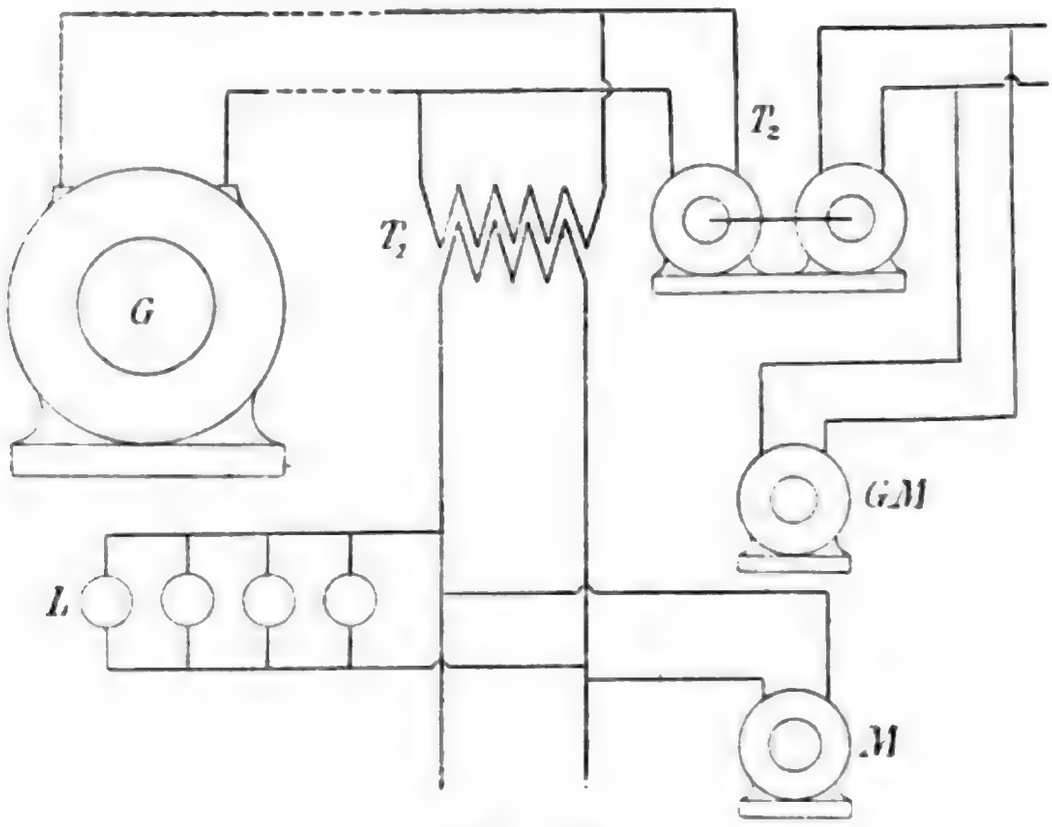


Fig. 86.

In diesem Falle ist es am zweckmäßigsten, in der Primärstation hochgespannten Wechselstrom zu erzeugen und diesen zu den Konsumenten zu führen. Benötigt der Konsument nur Wechselstrom, dann erhält er einen Transformator, welcher die hohe Spannung auf den erwünschten niederen Wert hinunter transformiert. Braucht er außerdem auch Gleichstrom, dann wird ein Motorgenerator in einer Unterstation aufgestellt, von hier gehen dann die den

Gleichstrom führenden Leitungen aus und diese bilden ein sekundäres Verteilungsnetz.

Die schematische Darstellung ist aus Fig. 86 ersichtlich.

In der Primärstation wird der hochgespannte Wechselstrom im Generator G erzeugt. Auf der Sekundärstation ist ein Motorgenerator T_2 aufgestellt, welcher aus einem Hochspannungsmotor und einem Gleichstromgenerator besteht. Der letztere erzeugt den Gleichstrom für Konsumenten, welche nur solchen benötigen.

In diesem Verteilungssystem können auch Wechselstrommotoren verwendet werden. Der Transformator T_1 erzeugt den niedergespannten Wechselstrom, welcher als solcher verwendet wird.

Die Schaltungen können auch so kombiniert werden, daß man beim Motorgenerator einen Niederspannungsmotor verwendet und den hochgespannten Strom zuerst auf die benötigte Betriebsspannung des Motors hinunter transformiert. Diese Methode verursacht zweifache Transformationsverluste, immerhin ist sie empfehlenswert anzuwenden, weil hier das Betriebspersonal mit dem hochgespannten Strom nicht in Berührung kommen kann.

Die Lampen können in diesem Stromverteilungssystem sowohl mit Wechsel- als auch mit Gleichstrom betrieben werden.

In Budapest besorgen zwei Gesellschaften die Stromlieferung für die elektrische Beleuchtung und motorische Zwecke.

Die ungarische Elektrizitäts-Aktiengesellschaft erzeugt in ihrer Primärstation einphasigen Wechselstrom von 3000 Volt Spannung. Dieser Strom wird zu den an den Verbrauchsstellen untergebrachten Transformatoren geführt, welche ihn auf 105 Volt hinunter transformieren. Alle Transformatoren sind untereinander parallel geschaltet, die Konstanz der Sekundärspannung wird dadurch erreicht, daß die

Primärspannung in der Zentrale konstant gehalten wird.

Die andere Zentralstation, welche der Budapester Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft gehört, benutzt zwar auch Wechselstrom, doch erhalten die Konsumenten nur Gleichstrom. Die Einrichtung dieses Stromverteilungsnetzes ist aus Fig. 87 ersichtlich.

In der Primärstation wird zweiphasiger Wechselstrom von der Spannung von 2000 Volt erzeugt und dieser in vier Unterstationen geleitet, welche

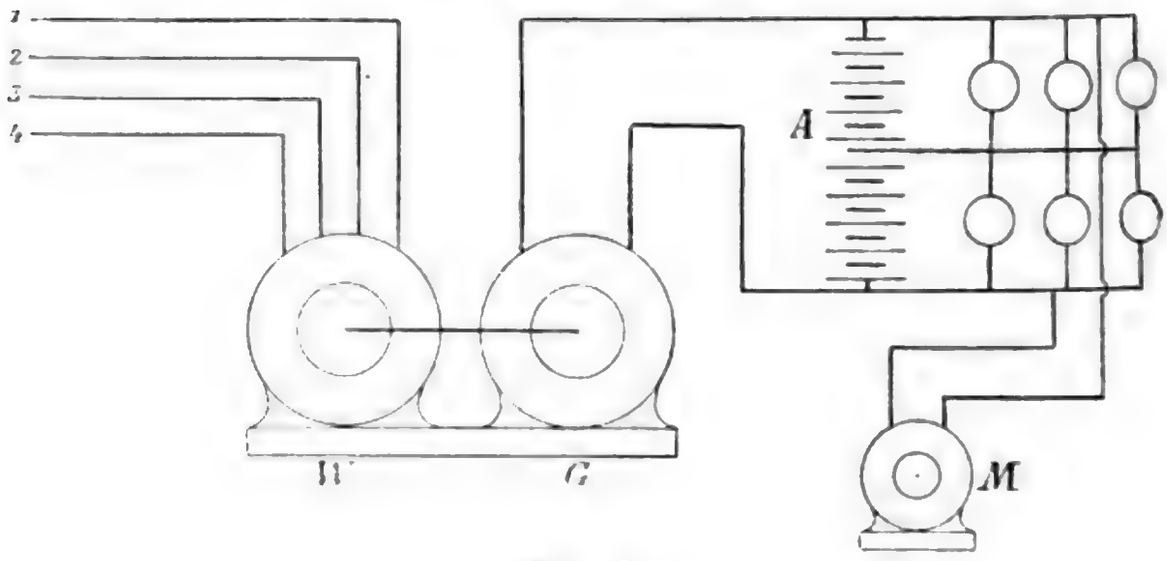


Fig. 87.

an verschiedenen Punkten der Stadt liegen. Diese Unterstationen haben rotierende Transformatoren in der Gestalt von Motorgeneratoren *W G*, welche aus direkt gekuppeltem Hochspannungsmotor und einem Gleichstromgenerator bestehen. Der erzeugte Gleichstrom hat eine Spannung von 220 Volt und das Gleichstromnetz ist nach dem Dreileiter-System ausgeführt. Zu diesem Zwecke ist der Gleichstromgenerator mit einer Akkulumatorenbatterie *A* parallel geschaltet, die zwei Außenleiter des Dreileitersystems sind die Hauptleiter der Dynamomaschine, während der Mittelleiter vom Mittelpunkte der Akkumulatorenbatterie abzweigt.

Zwischen dem Mittelleiter und je einem Hauptleiter herrscht eine Spannung von 110 Volt, während zwischen zwei Außenleitern 220 Volt Spannung zur Verfügung stehen.

Die Lampen werden zwischen einem Außenleiter und dem Mittelleiter geschaltet, Motoren gewöhnlich zwischen die Außenleiter. Ist die Belastung der so entstehenden zwei Stromkreise von 110 Volt Spannung gleichmäßig, dann fließt in den Mittelleiter kein oder nur ein sehr schwacher Ausgleichsstrom.

Diese Stromverteilung ist der ersteren gegenüber mit größeren Transformationsverlusten verbunden, da der Motorgenerator nie solchen Wirkungsgrad erreichen kann wie ein Wechselstrom transformator, zudem muß noch der Wirkungsgrad der Akkumulatorenbatterie auch in Betracht gezogen werden. Demgegenüber ist beim ersteren System ein Nachteil, daß die Transformatoren Energie verzehren, ob sie belastet oder leer arbeiten. Diesem Nachteile sucht man in neuerer Zeit dadurch abzuhelfen, daß man bei größeren Transformatoren einen Zusatztransformator aufstellt, welcher in Verbindung mit einem automatischen Schalter den großen Trans formator nur dann in Tätigkeit setzt, wenn eine größere Belastung dies erfordert, bei kleinen Belastungen ist der große Transformator ausgeschaltet und der Strombedarf wird nur durch den kleineren Transformator gedeckt. Der letztere ist in den Primärkreis ständig eingeschaltet.

Schaltungsweise zur Umwandlung des zweiphasigen Wechselstromes in Drehstrom.

Hat man zweiphasigen Wechselstrom zur Verfügung, dann kann dieser mit folgender von Ch. F. Scott herrührender Schaltung leicht in Drehstrom umgewandelt werden.

Der Zweiphasenstrom besteht aus zwei Wechselströmen, welche in der Phase gegeneinander um 90° oder einer Viertelperiode verschoben sind. Um Drehstrom erhalten zu können, benötigt man eine Anordnung, welche ermöglicht, daß drei Wechselströme entstehen, welche gegeneinander in der Phase nicht um 90°, sondern um 120° verschoben sind. Das Prinzip dieser Anordnung ist aus folgendem zu ersehen.

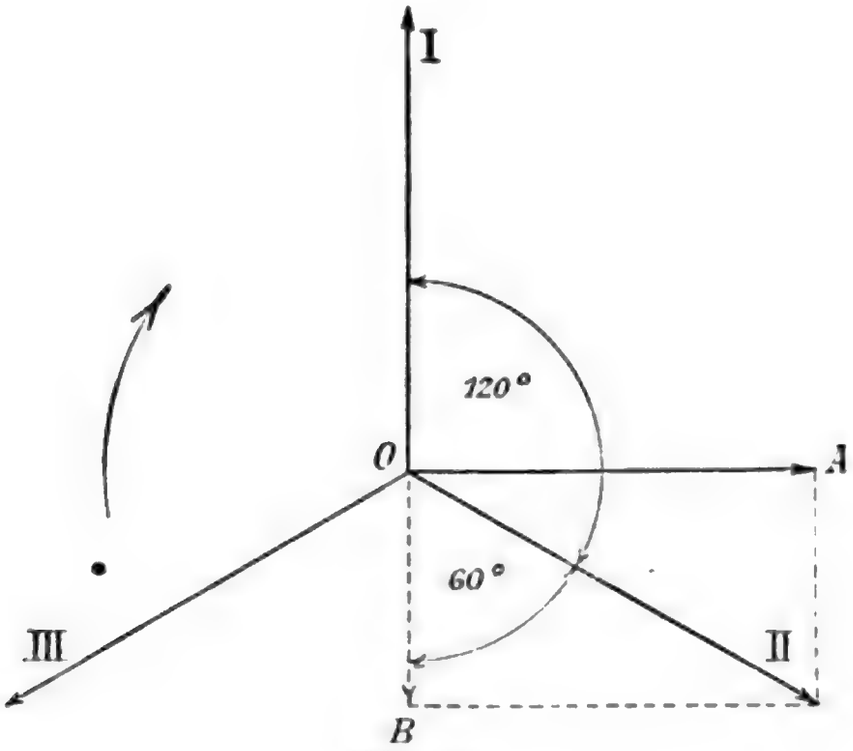


Fig. 88.

Der Drehstrom kann im Vektordiagramm durch drei um 120° gegeneinander verschobene Vektoren dargestellt werden. In Fig. 88 sind diese Vektoren *O I*, *O II* und *O III*.

Bei Zweiphasenstrom hat man zwei Vektoren zur Verfügung, welche senkrecht aufeinander stehen. Die Richtung eines Vektors fällt also mit der Richtung des einen Vektors des herzustellenden Drehstromes zusammen, der andere wieder kann dazu benutzt werden, um im Vereine mit dem ersten Vektor einen Vektor zu erzeugen,

welcher den zweiten Drehstromvektor bildet, welcher demnach gegen den ersteren in der Phase um 120° verschoben ist.

Sei dieser herzustellende Vektor OII. Wir können diesen als die Resultante zweier aufeinander rechtwinkelig stehenden Vektorkomponenten auffassen, so daß nach Fig. 88:

$$OII = OB\,(+)\,OA$$

wo (+) eine geometrische Addition bedeutet.

OB ist die Verlängerung des Vektors OI, so daß die Größe des Winkels $II\,OB = 60^0$ ist. Nun können wir die Komponentwerte folgendermaßen ausdrücken:

$$OB = OII\cos 60^0$$

oder nachdem $OII = OI$ sein muß, und

$$\cos 60^0 = \frac{1}{2}$$

wird

$$OB = \frac{1}{2}\,OI.$$

Die andere Komponente OA läßt sich auch als eine trigonometrische Funktion ausdrücken, und zwar ist:

$$OA = OII\cos 30^0 = OI\cos 30^0$$

oder da

$$\cos 30^0 = \frac{1}{2}\sqrt{3}$$

wird

$$OA = \overline{OI}\,\frac{1}{2}\sqrt{3} = 0{,}866\,.\,\overline{OI}.$$

Nun wird

$$OII = \frac{1}{2}\,OI\,(+)\,\frac{1}{2}\sqrt{3}\,OI$$

außerdem wissen wir, daß beide Komponenten senkrecht aufeinander stehen.

Nehmen wir an, daß die Zweiphasenspannung 100 Volt beträgt, dann wird

$$OA = \frac{1}{2}\overline{OI} = \frac{1}{2}\,100 = 50 \text{ Volt}$$

und

$$OB = \frac{1}{2}\sqrt{3}\,\overline{OI} = 0{,}866 \,.\, 100 = 86{,}6 \text{ Volt.}$$

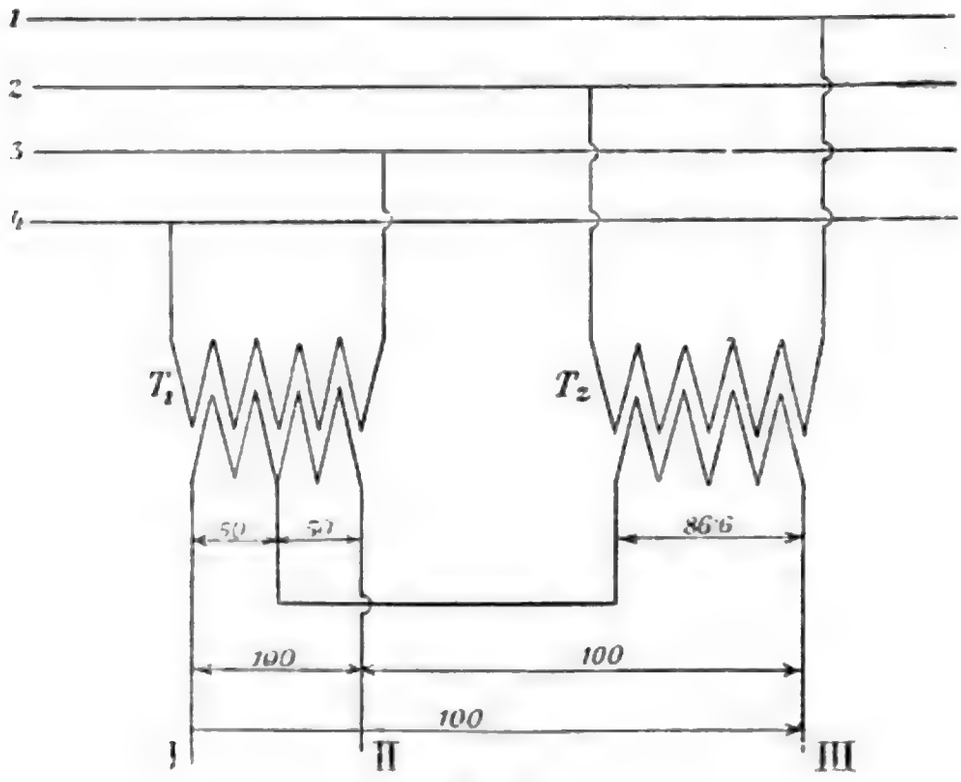


Fig. 89.

Die Durchführung dieser Anordnung ist aus Fig. 89 ersichtlich. Die Leiter 1, 2, 3 und 4 führen den zweiphasigen Wechselstrom zu zwei Transformatoren T_1 und T_2. Die Primärwicklungen sind unabhängig voneinander, während die Sekundärwicklungen so zusammengeschaltet werden, daß der Drehstrom entsteht.

Der Transformator T_1 transformiert die hohe Spannung auf 100 Volt. Die zwei Zuleitungen dieses Sekundärkreises bilden zwei Leiter des Drehstrom-

netzes. Der Transformator T_1 hat auch eine Mittelleitung, welche aus dem Mittelpunkte der Sekundärwicklung ausgeht, zwischen diesem und einem Außenleiter herrscht demnach die Potentialdifferenz von 50—50 Volt.

Diese 50 Volt Spannungen bilden die Komponenten der anderen Drehstromvektoren *II* und *III*, wenn man also noch die um 90^0 verschobene Komponentspannung von 86,6 Volt herstellt, dann erhält man als Resultierende die erwünschten Vektoren *O II* und *O III* (Fig. 88).

Zu diesem Zwecke verwendet man den Transformator T_2, welcher von der anderen Phase den Strom erhält. Die Sekundärspannung beträgt jetzt nicht 100 Volt, sondern nur 86,6 Volt, unseren Gleichungen entsprechend, so daß, wenn man die um eine Viertelperiode verschobenen Spannungen von 50 Volt und 86,6 Volt zusammensetzt, Spannungswerte von 100 Volt erreicht, außerdem sind diese resultierenden Spannungen zur Spannung *O I* = 100 Volt in der Phase um 120^0 verschoben.

Der so erhaltene Drehstrom fließt in die Leitungen *I*, *II* und *III*, zwischen welchen die Potentialdifferenz konstant (100 Volt) ist.

VI. Kapitel.

Formelsammlung.

Wert des resultierenden Stromes bei zweiphasigem Wechselstrom, wenn i_1 die Zweigstromstärke:

$$i = \sqrt{2}\, i_1 = 1{,}414\, i_1. \qquad 1)$$

Spannungsdifferenz zwischen zwei Außenleitern bei geschlossener Verkettung:

$$e_A = e_2. \qquad 2)$$

Bei offener Verkettung:

$$e^{\times} = \sqrt{2}\, e_2 = 1{,}414\, e_2. \qquad 3)$$

Stromstärke bei offener Verkettung:

$$i^{\times} = i_2. \qquad 4)$$

Momentwerte der Stromstärken beim zweiphasigen Wechselstrom:

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= J \sin \omega t \\ i_2 &= J \sin (\omega t + 90^0) \end{aligned}\right\} \qquad 5)$$

Für Spannungen bestehen ähnliche Gleichungen.
Für Drehstrom wird

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= J \sin \omega t \\ i_2 &= J \sin (\omega t + 120^0) \\ i_3 &= J \sin (\omega t + 240^0) \end{aligned}\right\} \qquad 6)$$

Summe der Momentwerte bei Drehstrom:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0. \qquad 7)$$

Leitungsstrom i_A, wenn der Zweigstrom in allen Zweigen i:

$$i_A = \sqrt{3}\, i. \qquad 8)$$

Geschlossen verkettete Drehstromspannung:

$$e_A = e_3. \qquad 9)$$

Dies ist zugleich der Wert der Sternspannung. Offen verkettete Drehstromspannung:

$$e_3^{\times} = \sqrt{3}\, e_3. \qquad 10)$$

Leistung des Drehstromes, wenn e die Phasenspannung und i die Stromstärke im Außenleiter:

$$W = \sqrt{3}\, e\, i \cos\varphi. \qquad 11)$$

Leistung des dreiphasigen Wechselstromes mit zwei Wattmeter gemessen (Seite 77):

$$W = W_1 + W_3. \qquad 12)$$

Zusammenhang zwischen der Drehstromspannung e_3 und der Gleichstromspannung e, wenn beide Ströme in derselben Armatur erzeugt werden, bei Dreieckschaltung:

$$e_3 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}\, e. \qquad 13)$$

Bei Stern- oder Y-Schaltung:

$$e_3^{\times} = \frac{3}{2\sqrt{2}}\, e. \qquad 14)$$

Dieselbe Armaturerwärmung angenommen, ist der Zusammenhang zwischen der durch dieselbe Maschine abgegebenen Drehstromleistung W_3 und der Gleichstromleistung W:

$$W_3 = 0{,}917\, W. \qquad 15)$$

Summe der Spannungen bei dreiphasigem Wechselstrom:

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0. \qquad 16)$$

Resultierender Strom beim Vierphasenstrome in geschlossener Verkettung:

$$i = \sqrt{2}\, i_4 = 1{,}414\, i_4. \qquad 17)$$

Bei offener Verkettung:

$$i^{\times} = i_4. \qquad 18)$$

Resultierender Strom bei parallelgeschaltetem Fünfphasenstrome:

$$i_A = 1{,}176\, i_5. \qquad 19)$$

Verkettete Spannung des Fünfphasenstromes $e_5^{\times}$:

$$e_5^{\times} = 1{,}176\, e_5. \qquad 20)$$

Leistung des Fünfphasenstromes (Seite 108):

$$W = 4{,}25\, e\, i \cos\varphi. \qquad 21)$$

Durch dieselbe Armatur erzeugte Fünfphasen- und Gleichstromspannung bei geschlossener Verkettung:

$$e_5 = 0{,}416\, e. \qquad 22)$$

Bei offener Verkettung:

$$e_5^{\times} = 0{,}489\, e. \qquad 23)$$

Zusammenhang zwischen der Fünfphasenleistung und der Gleichstromleistung einer Armatur, dieselbe Erwärmung und keine Phasenverschiebung vorausgesetzt:

$$W_5 = 1{,}04\, W. \qquad 24)$$

wenn W die Gleichstromleistung.

Resultierende Stromstärke des Sechsphasenstromkreises bei Parallel- und Serienschaltung:

$$i_A = i_6. \qquad 25)$$

Dasselbe steht für die Spannungen bei offener und geschlossener Verkettung.

Zusammenhang zwischen der Sechsphasen- und der Gleichstromspannung, wenn diese durch dieselbe Armatur erzeugt werden:

$$e_6 = e_6^{\times} = 0{,}354\, e. \qquad 26)$$

Leistung des Sechsphasenstromes im Vergleich zur Gleichstromleistung, bei derselben Armaturerwärmung und keiner Phasenverschiebung bei einer kombinierten Maschine (Seite 117):

$$W_6 = 1{,}06\, W. \qquad 27)$$

Leitungsstrom bei achtphasigem Wechselstrom in geschlossener Verkettung:

$$i_A = 0{,}765\, i_8. \qquad 28)$$

Für die Phasen- und Sternspannung bei *Y*-Schaltung:

$$e_8^{\times} = 0{,}765\, e_8. \qquad 29)$$

Wenn e die durch eine Armatur erzeugte Gleichstromspannung ist, dann wird bei denselben Verhältnissen die Achtphasenspannung e_8

$$e_8 = 0{,}271\, e. \qquad 30)$$

Leistungsverhältnisse in diesem Falle:

$$W_8 = 1{,}084\, W. \qquad 31)$$

Leitungsstrom bei geschlossem verkettetem Zwölfphasenstrom:

$$i_A = 0{,}518\, i_{12}. \qquad 32)$$

Zusammenhang zwischen der geschlossen verketteten Zwölfphasenspannung und der durch dieselbe Armatur unter denselben Bedingungen erzeugten Gleichstromspannung e:

$$e_{12} = 0{,}183\, e. \qquad 33)$$

Bei offener Verkettung:

$$e_{12}{}^{\times} = 0{,}095\, e. \qquad 34)$$

Leistung des Zwölfphasenstromes bei rein Ohmscher Belastung im Vergleich zur Gleichstromleistung W:

$$W_{12} = 1{,}098\, W. \qquad 35)$$

Phasenverschiebung zwischen zwei aufeinander folgenden Phasen bei n-phasigem Wechselstrom:

$$\varphi = \frac{2\pi}{n}. \qquad 36)$$

Resultierender Strom bei Parallelschaltung:

$$i_A = i_n \sqrt{2\left(1 - \cos\frac{2\pi}{n}\right)}. \qquad 37)$$

Wenn e_n die Sternspannung, dann wird die offen verkettete Spannung $e_n{}^{\times}$ folgenden Ausdruck haben:

$$e_n{}^{\times} = e_n \sqrt{2\left(1 - \cos\frac{2\pi}{n}\right)}. \qquad 38)$$

Zusammenhang zwischen der n-phasenspannung und der durch dieselbe Armatur erzeugten Gleichstromspannung e bei geschlossener Verkettung:

$$e_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin\frac{\pi}{n}\, e. \qquad 39)$$

Vergleich der Leistungen bei gleichen Armaturerwärmungen und keiner Phasenverschiebung, wenn W die Gleichstromleistung:

$$W_n = \frac{n}{2\sqrt{2}} \sin\frac{\pi}{n} W. \qquad 40)$$

Gegenseitiger Induktionskoeffizient zweier Leiter, wenn der gegenseitige Abstand d im Vergleiche zur Länge l der Leitungen gering ist:

$$L = 2l\left(\log n \frac{2l}{d} - 1 + \frac{\mu}{4}\right), \qquad 41)$$

wenn μ die Permeabilität des umgebenden Mediums bildet.

Gegenseitiger Induktionskoeffizient zweier Spulen aufeinander (Seite 149):

$$L = \frac{4}{3}\pi^2 l^2 n_1^2 n_2^2 (x-y)(y^3-z^3). \qquad 42)$$

Allgemeiner Ausdruck für die Kapazität eines Kondensators

$$c = \frac{Q}{e}, \qquad 43)$$

wo Q die aufgenommene Elektrizitätsmenge, e die Potentialdifferenz zwischen den Klemmen des Kondensators bedeutet.

Resultierende Phasenverschiebung bei Stromverzweigungen in Wechselstromleitungen (Seite 159):

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{w_2 \operatorname{tg}\varphi_1}{w_1 + w_2}}} \qquad 44)$$

wo (Seite 158):

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{w_2 \operatorname{tg}\varphi_1}{w_1 + w_2} \qquad 45)$$

und φ_1 der Phasenwinkel, den die zwei Abzweigstromstärken miteinander bilden.

Resultierender Strom bei zweifacher Stromabzweigung (Seite 160):

$$i = \frac{w_1 + w_2}{e \cos \varphi}. \qquad 46)$$

Wirkungsgrad einer Wechselstromleitung (Seite 161):

$$\eta = \frac{W_2}{W_2 + W_o}. \qquad 47)$$

Spannungsverlust bei Drehstromleitungen (Seite 167):

$$e_a - e_e = \sqrt{3}\, i\, r \frac{\sin \varphi_2{}^I - \sin \varphi_1{}^I}{\sin (\varphi_2{}^I - \varphi_1{}^I)}. \qquad 48)$$

Bei Einphasenleitungen (Seite 167):

$$e_a - e_e = i\, r \frac{\sin \varphi_2{}^I - \sin \varphi_1{}^I}{\sin (\varphi_2{}^I - \varphi_1{}^I)}. \qquad 49)$$

Sind Strom und Spannung in Phase, dann ist

$$e_a - e_e = i\, r \qquad 50)$$

beziehungsweise bei Drehstrom:

$$e_a - e_e = \sqrt{3}\, i\, r. \qquad 51)$$

Querschnitt einer Drehstromleitung (Seite 169):

$$q = \frac{3\, i^2\, l}{w_o\, \varrho} \qquad 52)$$

wo w_o der Energieverlust in den Leitungen.

Querschnitt bei $p\%$ Wattverlust (Seite 170):

$$q = \frac{100\, l\, w_a}{p\, \varrho\, e_a{}^2 \cos^2 \varphi}. \qquad 53)$$

Digitized by Google

Der auftretende prozentuale Wattverlust ist in einer Drehstromleitung (Seite 170):

$$p = \frac{100\, l\, w_e}{q\, \varrho\, e_e^2 \cos^2 \varphi}. \qquad 54$$

Gesamter Spannungsverlust in einer Wechselstromleitung (Seite 180):

$$\triangle = (a - b) \cos \varphi. \qquad 55$$

Namen- und Sachregister.

A.

Achtphasiger Wechselstrom 118.
— — geschlossene Verkettung des 120.
— — Leistung des 121.
— — offene Verkettung des 120, 122.
— — verkettete Spannung des 121.
Allgemeine Elektrizitäts - Gesellschaft 52.

B.

Bláthy 17.
Bradley 14, 51.
Budapester Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft 200.

D.

Déri 7, 17, 189.
Direkte Kraftübertragung 190.
Dobrowolsky 51.
Drehfeld des zweiphasigen Wechselstromes 27.
— Pulsation des 94.
Drehstrom 52.
— Leistung des 72.
— magnetisches Feld des 85.
Dreieckschaltung 59, 63, 65, 135.
Dreiphasenstrom 7, 50.
— verkettete Spannung des 72.
Drosselung 177.

E.

Energieverlust in Drehstromleitungen 169.
Erzeugung des Dreiphasenstromes 58, 62.
— — Vierphasenstromes 35.
— — Zweiphasenstromes 21.

F.

Feld, pulsierendes 91.
Feldstärke, resultierende 90.
Ferraris 5, 17, 50.
Formelsammlung 206.
Fünfphasiger Wechselstrom 102.
— — geschlossene Verkettung des 103.
— — Leistung des 108.
— — magnetisches Drehfeld des 107.
— — offene Verkettung des 105.
— — verkettete Spannung des 106.

G.

Gegenseitige Induktion bei Wechselstromleitungen 149.
— — Koeffizient der 149.
General Electric Company 196.
Gesamtverlust in Wechselstromleitungen 180.
Geschlossene Verkettung des Achtphasenstromes 120.
— — — Dreiphasenstromes 65.
— — — Fünfphasenstromes 103.
— — — n-phasenstromes 130.
— — — Sechsphasenstromes 113.
— — — Vierphasenstromes 36.
— — — Zweiphasenstromes 40.

Digitized by Google

Geschlossene Verkettung des Zwölfphasenstromes 125.
Gramme 7.

H.

Haselwander 51.
Hutin und Leblanc 17.

I.

Imhoff 191, 194.
Indirekte Kraftübertragung 191.
Induktiver Spannungsverlust 176, 177, 179.

K.

Kabel 151, 179.
Kapazität 150.
— der Wechselstromleitungen 151.
Koeffizient der gegenseitigen Induktion 149.
Kombinierte Schaltung des Dreiphasenstromes 62, 136.
Kondensator 150.
Kraftübertragung, direkte 190.
— indirekte 191.
Kunstphase 17.

L.

Leblanc 17.
Leistung des Achtphasenstromes 121.
— — Drehstromes 72.
— — — Messung der 75.
— — Fünfphasenstromes 108.
— — Zwölfphasenstromes 127.
Leistungsfaktor 158.
Leitungsdrosselung 179.
Leitvermögen 168.

M.

Magnetisches Feld des Drehstromes 85.
— — — Fünfphasenstromes 107.
Mehrphasenleitungen 160.
Mehrphasenstromsysteme 101.
Mehrphasige Wechselströme 1.
Messung der Leistung des Drehstromes 75.
Monocyclic System 196.

N.

n-phasiger Wechselstrom 130.
— — geschlossene Verkettung des 130.
— — Leistung des 132.
— — offene Verkettung des 130.
— — verkettete Spannung des 131.

O.

Offene Verkettung des Achtphasenstromes 120.
— — — Dreiphasenstromes 70.
— — — Fünfphasenstromes 105.
— — — *n*-phasenstromes 130.
— — — Sechsphasenstromes 113, 116.
— — — Vierphasenstromes 45.
— — — Zweiphasenstromes 43.
— — — Zwölfphasenstromes 126.
Ohmscher Spannungsverlust 162, 176.
— Widerstand 168.

P.

Parallelschaltung des Zweiphasenstromes 40.
Phasenspannung 71.
Phasenverhältnisse des Zweiphasenstromes 47.
— in Wechselstromleitungen 153.
Prozentueller Wattverlust in Drehstromleitungen 169, 170.
Pulsation des Drehfeldes 94.
Pulsierendes Feld 91.

Q.

Querschnitt einer Drehstromleitung 167, 170.

R.

Resultierende Feldstärke 90.
— Stromstärke in einer Wechselstromleitung 159.
Rotation des magnetischen Feldes 31.

Digitized by Google

S.

Schaltungen bei Mehrphasenstromsystemen 134.
Scott 201.
Sechsphasenstrom 7.
— geschlossene Verkettung des 113.
— offene Verkettung des 113, 116.
— verkettete Spannung des 115
Sechsphasige Stromkreise 111.
Selbstinduktion der Wechselstromleitungen 146, 176.
Serienschaltung des Dreiphasenstromes 61.
— — Vierphasenstromes 37.
— — Zweiphasenstromes 43.
Siemens & Halske 136.
Spannung, Phasen- 71.
— Stern- 71.
— verkettete 72.
Spannungsverhältnisse bei Drehstromschaltungen 65.
Spannungsverlust bei Drehstromleitungen 167.
— — Einphasenleitungen 167.
— induktiver 176, 177, 179.
— Ohmscher 162, 176.
Spannungsverluste in Wechselstromleitungen 176, 187.
Sternschaltung 59, 61, 64, 70, 136.
Sternspannung 71.
Stromdichte 151.
Stromverhältnisse bei Drehstromschaltungen 65.

T.

Tesla 5, 14, 50.
Tompson 7.

U.

Umwandlung des Zweiphasenstromes in Drehstrom 201.
Ungarische Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft 199.

V.

Verkettete Spannung des Achtphasenstromes 121.
— — — Dreiphasenstromes 72.
— — — Fünfphasenstromes 106.
Verkettete Spannung des n-phasenstromes 131.
— — — Sechsphasenstromes 115.
— — — Vierphasenstromes 46.
— — — Zweiphasenstromes 43.
— — — Zwölfphasenstromes 127.
Verschiedene Mehrphasenstromsysteme 101.
Verteilungssystem für Gleich- und Wechselstrom 198.
Vierphasenspannung 36.
Vierphasenstrom 7, 35.
— offene Verkettung des 37, 45.

W.

Wattverlust in Drehstromleitungen 169.
Wechselstrom, achtphasiger 118.
— dreiphasiger 50.
— fünfphasiger 102.
— n-phasiger 130.
— sechsphasiger 7, 111.
— vierphasiger 35.
— zweiphasiger 19.
— zwölfphasiger 124.
Wechselstromleitungen 146.
— gegenseitige Induktion bei 149.
— Kapazität der 151.
— mit Abzweigungen 154.
— Phasenverhältnisse in 153
— resultierende Stromstärke in 159.
— Selbstinduktion der 146.
Wechselstromsysteme 186.
Wenström 51.
Widerstand, Ohmscher 168.
Wirkungen der Selbstinduktion 149.
Wirkungsgrad der Leitung 161.

Z.

Zipernowsky 7, 17, 189, 192.
Zweiphasenstrom 7, 19.
— in Parallelschaltung 40.
— in Serienschaltung 43.
— verkettete Spannung des 43.
Zwölfphasenspannung, geschlossen verkettete 127.
Zwölfphasenstrom, Leistung des 127.
Zwölfphasiger Wechselstrom 124.

Elektro-technische Bibliothek. Band LVII.

ELEKTRISCHE STRASSENBAHNEN.

Von

JOHANNES ZACHARIAS.

MIT 128 ABBILDUNGEN.

WIEN. PEST. LEIPZIG.
A. HARTLEBEN'S VERLAG.

Preis geh. 4 K 40 h = 4 Mark, gebdn. 5 K 50 h = 5 Mark.

A. Hartleben's Elektro-technische Bibliothek.

Die ausserordentlich grosse Anzahl von wichtige findungen der Neuzeit, denen die Anwendung der Elektr zu Grunde liegt, und die überraschenden Erfolge, welche Telegraphie, der Telephonie, der elektrischen Bel tung, der Galvanoplastik, der elektrischen Kraft tragung, der Elektrolyse etc. während der letzten Jahre erzielt worden sind, zeigen, dass das Studium der Elektricität in eine ganz neue Phase eingetreten ist und gegenwärtig einen vollständig veränderten Gesichtspunkt gewonnen hat.

Während früher die Elektricität fast ausschliesslich den Physiker beschäftigte, ist heutzutage diese Wissenschaft in die Hände des Ingenieurs übergegangen, und die auf theoretischem und experimentellem Gebiete von den grossen Forschern unseres Jahrhunderts errungenen Resultate haben die Basis gelegt für einen neuen Zweig der angewendeten Physik, welcher an Bedeutung fast alle übrigen Zweige zu übertreffen beginnt, nämlich die Elektro-Technik.

Noch vor einer Reihe von Jahren glaubte das Publikum kaum an das Vorhandensein einer elektro-technischen Wissenschaft; die internationalen elektrischen Ausstellungen der letzten Jahre haben jedoch der Welt in glänzender Weise bewiesen, dass eine Elektro-Technik nicht nur vorhanden ist, sondern dass dieselbe auch bereits auf einer solchen Stufe der Entwicklung steht, dass Niemand mehr über die vielversprechende Zukunft derselben im Zweifel sein kann; mit jedem Tage wächst die Zahl der Erfindungen, die der Elektricität immer weitere Kreise des menschlichen Lebens erschliessen, und wir stehen vor einer Aera, in der die Elektricität die Führerin im gewerblichen und technischen Leben zu spielen berufen ist.

Um nun allen denen, die sich für Elektro-Technik interessiren, ihren praktischen Beruf oder die Uebersicht durch ein passendes literarisches Hilfsmittel zu erleichtern, hat die unterzeichnete Verlagsbuchhandlung sich entschlossen, eine Reihe von Handbüchern über angewendete Elektricität zu veröffentlichen, welche von hervorragenden Fachmännern mit speciellerRücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis verfasst sind und sich in Plan und Ausführung an die von derselben Verlagshandlung herausgegebene »Chemisch-technische Bibliothek« anschliessen.

Die

ELEKTRICITÄT IM DIENSTE DER MENSCHHEIT.

Eine populäre Darstellung der magnetischen und elektrischen Naturkräfte und ihrer praktischen Anwendungen.

Nach dem gegenwärtigen Standpunkte der Wissenschaft bearbeitet von **Dr. Alfred Ritter von Urbanitzky.**

Zweite, gänzlich neu bearbeitete Auflage. Mit 1000 Illustrationen. 60 Bogen. Gross-Oktav. Geheftet 13 fl. = 12 M. 50 Pf. in Original-Prachtband gebunden 18 fl. = 15 M.

DIE ELEKTRICITÄT DES HIMMELS UND DER ERDE

von **Dr. Alfred Ritter von Urbanitzky.**

Mit 400 Illustr. und Farbentafeln. 62 Bog. Gross Oktav. Geh. 12 fl. = 10 M. 80 Pf. In Original-Prachtband 14 fl. 40 kr. = 13 M.

Die physikalischen Grundsätze der

ELEKTRISCHEN KRAFTÜBERTRAGUNG.

Eine Einleitung in das Studium der Elektrotechnik.

Von **Josef Popper.**

Mit einer Figurentafel. 4 Bogen. Gross-Oktav. Geheftet 1 fl. 60 kr. = 1 M. 50 Pf.

Elektrische Erscheinungen u. Theorien. Kurzer Abriss der neueren Theorien. Vorlesungen, abgehalten in der Royal Institution of Great Britain von John Tyndall. Mit des Autors Bewilligung in den Deutschen Übertragen von Fanny Lewald. Sechste, Pfg. Ausgabe. 8 Bogen. Geh. 2 fl. = 1 M. 80 Pf.

Das elektrische Potential und Grundzüge der Elektrostatik. Von A. Seeliger. Prof. der Physik an der Universität zu A. Lesezirkel in Dublin. Aus dem Italienischen von Dr. Alfred Ritter von Urbanitzky. Dr. d. Philosophie. Mit 2 Holzschnitten. Zweite Ausgabe. Mit 4 Abbild. 16 Bog. Oct. Geh. 4 fl. 80 kr. = 4 M. 20 Pf.

Vorträge über Elektricität. Von John Tyndall. Mit des Autors Bewilligung in den Deutsche Übertragen von Joseph v. Baschnagel. Mit 58 Abbildungen. 10 Bogen. Geh. 3 fl. 40 kr. = 3 M. 60 Pf.

Die atmosphärische Elektricität. Von Dr. Alfred Gatzert. Mit Zustimmung des Verfassers aus dem Italienischen übersetzt von Alexander Lucas, k. k. Telegraphen-Official. Mit 8 Abbild. 4 Bog. Oct. Geh. 1 fl. 20 kr. = 1 M. 20 Pf.

Die mechanischen, elektrostatischen und elektromagnetischen Absolute Maass, mit Anwendung auf mehrfache elektrische Einheiten gebraucht von Prof. A. Seligsohn. Deutsch von Dr. Alfred Ritter von Urbanitzky. Zweite Ausgabe. Mit 4 Abbild. 2 Bog. Oct. Geh. 1 fl. 40 kr. = 1 M. 50 Pf.

DIE ELEKTRICITÄT.

Eine kurze und verständliche Darstellung der Grundsätze, sowie der Anwendungen der Elektricität zur Kraftübertragung, Beleuchtung, Elektrometallurgie, Galvanoplastik, Telegraphie, Telephonie und in Signalwesen.

Zweite Auflage.

Bearbeitung von Bauleuten von

Dr. Alfred von Urbanitzky,

Docent an

Th. Schwartze, E. Japing u. A. Wilke.

Mit 183 Abbildungen.

10 Bog. Oct. Geheftet 1 fl. 60 kr. = 1 M. 50 Pf.

Die Fortentwicklung

der elektrischen

EISENBAHN-EINRICHTUNGEN

von

L. Kohlfürst,

Eisenbahn-Oberingenieur a. D.

Mit 106 Abbildungen. 20 Bogen. Oktav.

Geh. 3 fl. 40 kr. = 3 Mark.

Gebdn. 4 fl. 60 kr. = 4 Mark.

A. Hartleben's Verlag in Wien, Pest und Leipzig.

A. Hartleben's Elektro-technische Bibliothek.

In rasch illustrirten Bänden geheftet à 3 M. 50 = 4 fl. 20 kr. = 5 Mark; — à 4 M. = 4 fl. 80 kr. = 6 Mark; — à 5 M. = 6 fl. = 7 Mark; — à 6 M. = 7 fl. 20 kr. = 8 Mark.

Als Band I/II kosten jeder Band geh. à 4 M. 80 = 6 Mark; geb. à 6 M. 60 = 8 Mark.

Bisher erschienene Bände:

I. Band. Grawinkel-Strecker. Die dynamo-elektrischen Maschinen. Ihre Geschichte, Construction, Wirkungsweise und Verwendung in der Praxis. Vierte Auflage. — Mit 346 Abbildungen. Die elektrische Kraftübertragung und ihre Anwendung in der Praxis mit besonderer Berücksichtigung auf die Fernleitung und Vertheilung des elektrischen Stromes. Von Eduard Japing. 2 Auflage. — III. Band. Das elektrische Licht. Von Dr. A. v. Urbanitzky. 2. Auflage. — IV. Band. Die Accumulatoren, ihre Geschichte, Construction und Anwendung. Von Gerald Cattelin. Eine Beschreibung der Systeme und theoretischen Erörterungen mit besonderer Berücksichtigung auf die Praxis. Mit 100 Abbildungen. — V. Band. Die Telegraphie. Von Dr. Alexander Wilke. — VI. Band. Die Telephon-Telegraphie, mit besonderer Rücksicht auf die Beschreibung der Telephone. Von Dr. Hugo Krutz. — VII. Band. Die Elektrizität, Galvanoplastik und Kunstgalvanisirung, mit besonderer Rücksicht auf die neueren Erfindungen und Verfahren. Von Dr. Alexander Wilke. — VIII. Band. Die elektrischen Mess- und Prüfungs-Instrumente. Ein Lehr- und Nachschlagebuch für Studirende, Techniker und Praktiker. Von Prof. Dr. Hans Lehmann. — IX. Band. Elektrische Kraftübertragung. Eine Beschreibung der Systeme und theoretischen Erörterungen mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Praxis. Von W. Ph. Hauck. 3 Auflage. — X. Band. Elektrische Formeln und Tabellen. Ein Hilfsbuch für Elektrotechniker, Elektrochemiker, Elektrometallurgen und angehende Studirende. Von Prof. Dr. Gerh. Holtz. Band. Das elektrische Licht. Von Dr. A. v. Urbanitzky. 2. Auflage. — XII. Band. Die Elektrizität im Dienste der Krankheilung. Von Dr. Alex. Wilke. — XIII. Band. Elektrische Kraftübertragung. Eine Beschreibung der Einrichtungen und des Signalwesens. Von L. Kohlfurst. — XIII. Band. Die elektrischen Bahnen und die Fernwirkung elektrischer Ströme. Von Dr. Alex. Wilke. — XIV. Band. Haus- und Hotel-Telegraphie. Von U. Cattelin. 2. Auflage. — XV. Band. Die Anwendung der Elektrizität für militärische Zwecke. Von Dr. Alex. Wilke. — XVI. Band. Die Blitzableiter-Anlagen und ihre Anlage für alle Zwecke der Praxis. Von J. Zacharias. 2. Auflage. — XVII. Band. Die Elektrizität im Bergbau. Von Dr. Alex. Wilke. — XVIII. Band. Elektrische Uhren. Von Dr. Alex. Wilke. — XIX. Band. Elektrische Beleuchtung. Von Dr. Alex. Wilke. — XX. Band. Die Beleuchtung mit elektrischem Licht. Von Dr. Rud. Lewandowski. — XXI. Band. Die Telephonie. Von Dr. Alex. Wilke. — XXII. Band. Die Elektrizität in der Landwirthschaft. Von Dr. Alex. Wilke. — XXIII. Band. Weltfärberei der Elektrizität u. des Magnetismus, von 1880—1885. Von Gustav Mayer. — XXIV. Band. Die Motoren für elektrische Maschinen. Von Dr. Alex. Wilke. — XXV. Band. Elektrochemie und Technik. Von Theodor Schwartze. — XXVI. Band. Die Generatoren hochgespannter Elektrizität. Von Prof. Dr. H. Th. Simon. — XXVII. Band. Die Elektrizität in der Landwirthschaft. Anwendung der Elektrizität zum Pflügen, Säen, Ernten, Dreschen, Heuen, Melken, Buttern, Kochen, Waschen, Bügeln, Nähen, Heizen, Beleuchten, Treiben von Arbeitsmaschinen, Wasserpumpen, Brunnenbohren, Bewässern, Entwässern, Vertilgen von Ungeziefer, Unkraut, Moos, Schwämmen, Fäulniss, Krankheitserregern, Wasserreinigung, Bodenlockerung, Bodenbearbeitung, Bodenverbesserung, Bodenuntersuchung, Bodenanalyse, Wetterprognosen, Blitzableitung. Von Max Jolly. — XXVIII. Band. Das Gusseisen, sein Wesen und seine Erkennung. Von Wilhelm Gerhardi. — XXIX. Band. Elektrische Kraftübertragung. Von Dr. Gustav Albrecht. — XXIX. Band. Blitz- und Blitz-Schutzvorrichtungen. Von Dr. A. v. Urbanitzky. — XXX. Band. Die Elektrizität in der Landwirthschaft. Von Dr. Alex. Wilke. — XXXI. Band. Die fabrikmässige Herstellung von Metalldrähten. Von Josef Schaschl. — XXXI. Band. Die Technik der Photographie. Von Dr. Alex. Wilke. — XXXII. Band. Die Technik der elektro-technischen Photographie. Von Dr. Hugo Krutz. — XXXIII. Band. Die Laboratoriums-Praxis. Von Dr. Alex. Wilke. — XXXIII. Band. Die Elektrizität in der Landwirthschaft. Anwendung der elektrischen Kraft zum Pflügen, Säen, Ernten, Dreschen, Heuen, Melken, Buttern, Kochen, Waschen, Bügeln, Nähen, Heizen, Beleuchten, Treiben von Arbeitsmaschinen, Wasserpumpen, Brunnenbohren, Bewässern, Entwässern, Vertilgen von Ungeziefer, Unkraut, Moos, Schwämmen, Fäulniss, Krankheitserregern, Wasserreinigung, Bodenlockerung, Bodenbearbeitung, Bodenverbesserung, Bodenuntersuchung, Bodenanalyse, Wetterprognosen, Blitzableitung. Von Max Jolly. 2. Auflage. — XXXIV. Band. Die Elektrizität und Magnetismus als konstruktionelle Kräfte. Von Dr. Theodor Hoffmann. — XXXIV. Band. Die Elektrizität in der Landwirthschaft. Von Dr. Alex. Wilke. 2. Auflage. — XXXIV. Band. Elektrische Kraftübertragung. Eine Beschreibung der Einrichtungen und des Signalwesens. Von Leo Kohlfurst. 2. Auflage. — XXXV. Band. Elektrische Kraftübertragung. Eine Beschreibung der Einrichtungen und des Signalwesens. Von Leo Kohlfurst. 3. Auflage. — XXXV. Band. Die elektrischen Bahnen und die Fernwirkung elektrischer Ströme. Von Dr. Alex. Wilke. 2. Auflage. — XXXVI. Band. Die Elektrizität in der Landwirthschaft. Von Dr. Alex. Wilke. 3. Auflage. — XXXVI. Band. Haus- und Hotel-Telegraphie. Von U. Cattelin. 2. Auflage. — XXXVI. Band. Die Anwendung der Elektrizität für militärische Zwecke. Von Dr. Alex. Wilke. 2. Auflage. — XXXVII. Band. Die Leitungen und ihre Anlage für alle Zwecke der Praxis. Von J. Zacharias. 2. Auflage. — XXXVII. Band. Die Elektrizität im Bergbau. Von Dr. Alex. Wilke. 2. Auflage. — XXXVIII. Band. Elektrische Uhren. Von Dr. Alex. Wilke. 2. Auflage. — XXXVIII. Band. Elektrische Beleuchtung. Von Dr. Alex. Wilke. 2. Auflage. — XXXIX. Band. Die Beleuchtung mit elektrischem Licht. Von Dr. Rud. Lewandowski. 2. Auflage. — XXXIX. Band. Die Telephonie. Von Dr. Alex. Wilke. 2. Auflage. — XL. Band. Weltfärberei der Elektrizität u. des Magnetismus, von 1885—1888. Von Gustav Mayer. — XLI. Band. Die Motoren für elektrische Maschinen. Von Dr. Alex. Wilke. 2. Auflage. — XLII. Band. Elektrochemie und Technik. Von Theodor Schwartze. — XLII. Band. Die Generatoren hochgespannter Elektrizität. Von Prof. Dr. H. Th. Simon. 2. Auflage. — XLIII. Band. Die Technik der Photographie. Anwendung der Elektrizität zum Pflügen, Säen, Ernten, Dreschen, Heuen, Melken, Buttern, Kochen, Waschen, Bügeln, Nähen, Heizen, Beleuchten, Treiben von Arbeitsmaschinen, Wasserpumpen, Brunnenbohren, Bewässern, Entwässern, Vertilgen von Ungeziefer, Unkraut, Moos, Schwämmen, Fäulniss, Krankheitserregern, Wasserreinigung, Bodenlockerung, Bodenbearbeitung, Bodenverbesserung, Bodenuntersuchung, Bodenanalyse, Wetterprognosen, Blitzableitung. Von Max Jolly. 3. Auflage. — XLIII. Band. Die elektrischen Verbrauchsmesser. Von Richard Krüger. — XLIV. Band. Die elektrische Schweissung und Löthung. Von Richard Krüger. — XLV. Band. Das elektrische Accumulatoren und ihre Verwendung in der Praxis. Von Josef Sachs. — XLVI. Band. Die elektrischen Mess- und Prüfungs-Instrumente. 2. Auflage. — XLVII.–XLVIII. XLIX. bis L. Band. Angewandte Elektrochemie. In vier Bänden. Von Dr. Ernst Bose. — LI. Band. Die Elektrizität in der Landwirthschaft. Von Dr. Alex. Wilke. 4. Auflage. Anregungen praktischer Elektrotechnik. II. Band. Originelle Elektrochemie. — LI. und LII. Band. Die Elektrizität und Magnetismus als konstruktionelle Kräfte. Von Dr. Theodor Hoffmann. 2. Auflage. — LIII. Band. Elektrische Kraftübertragung. Von Leo Kohlfurst. 4. Auflage. — LIII., LIV., LV. u. LVI. Bd. Elektrometallurgie u. Galvanochemie. Für Studirende, Techniker und Praktiker. Von Dr. Wilhelm Borchers. 2. Auflage. — LVII. Band. Die Elektrizität in der Landwirthschaft. Von Dr. Alex. Wilke. 5. Auflage.

Elektro-technische Bibliothek. Band LVIII.

302754

Wechselstromtechnik.

In vier Bänden.

I. Band.

Der einphasige Wechselstrom.

Von

M. T. ZSAKULA

dipl. Maschinening enieur, Assistent an der techn. Hochschule in Budapest.

Mit 84 Abbildungen.

WIEN und LEIPZIG.

A. HARTLEBEN'S VERLAG.

Preis K 4·20 = 4 Mark, gebunden K 5·30 = 5 Mark.

Elektro-technische Bibliothek. Band LIX.

302755

Wechselstromtechnik.

In vier Bänden.

II. Band.

Mehrphasige Wechselströme und Wechselstromsysteme.

Von

M. T. ZSAKULA

dipl. Maschineningenieur, Assistent an der techn. Hochschule in Budapest.

Mit 89 Abbildungen.

WIEN und LEIPZIG.

A. HARTLEBEN'S VERLAG.

Preis ℳ 4·40 = 4 Mark, gebunden ℳ 5·50 = 5 Mark.

ized by Google